



SOLS ARTIFICIALISÉS ET PROCESSUS D'ARTIFICIALISATION DES SOLS : DÉTERMINANTS, IMPACTS ET LEVIERS D'ACTION

SYNTHÈSE DE L'EXPERTISE SCIENTIFIQUE COLLECTIVE - DÉCEMBRE 2017



Responsables scientifiques :

Béatrice Béchet – Ifsttar, l'IRSTV CNRS (FR2488)

Yves Le Bissonnais, Inra, LISAH

Anne Ruas, Ifsttar, COSYS – LISIS

Directeur de la publication :

Bertrand Schmitt - Inra, Directeur de la Délégation à l'Expertise scientifique, à la Prospective et aux Etudes (DEPE)

Contacts:

Béatrice Béchet : beatrice.bechet@ifsttar.fr

Yves Le Bissonnais : yves.le-bissonnais@inra.fr

Anne Ruas: anne.ruas@ifsttar.fr

Bertrand Schmitt : bertrand.schmitt@inra.fr

Pour citer ce document : Béatrice Béchet, Yves Le Bissonnais, Anne Ruas (coord.), Anne Aguilera, Hervé Andrieu, Eric Barbe, Philippe Billet, Jean Cavailhès, Marianne Cohen, Sophie Cornu, Laetitia Dabanc, Cécile Delolme, Ghislain Géniaux, Mickaël Hedde, Sophie LCatherine Mering, Marjorie Musy, Mario Polèse, Christiane Weber, Maylis Desrousseaux, Antoine Frémont, Sophie Le Perchec, Bertrand Schmitt, Isabelle Savini, 2017. Sols artificialisés et processus d'artificialisation des sols : déterminants, impacts et leviers d'action. Synthèse du rapport d'expertise scientifique collective, Ifsttar-Inra (France), 127 p.

Le présent document constitue la synthèse du rapport d'expertise scientifique collective sollicitée conjointement par le ministère en charge de l'Environnement (Commissariat général au développement durable, CGDD, Ministère de la transition écologique et solidaire, MTES), l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) et le ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation (Direction générale de la performance économique et environnementale des entreprises, DGPE), conventions n°15-MBGD-GEOSOL-1cvs001, n°14-60-C0067, n°154-14-13.

Le contenu du rapport et du document de synthèse n'engage que la responsabilité de leurs auteurs. Le rapport de l'expertise, source de cette synthèse, a été élaboré par les experts scientifiques sans condition d'approbation préalable par les commanditaires, l'Ifsttar ou l'Inra. La synthèse a été validée par les auteurs du rapport.

Ces documents sont disponibles sur le site institutionnel de l'Inra (www.inra.fr)



Délégation à l'Expertise, à la Prospective
et aux Etudes (DEPE)



Sols artificialisés et processus d'artificialisation des sols : déterminants, impacts et leviers d'action

Synthèse du rapport d'expertise scientifique collective

Auteurs :

Béatrice Béchet, Yves Le Bissonnais, Anne Ruas,
Maylis Desrousseaux, Antoine Frémont, Isabelle Savini, Bertrand Schmitt

Experts coordinateurs :

Anne Aguilera, Hervé Andrieu, Eric Barbe, Philippe Billet, Jean Cavailhès, Marianne Cohen, Sophie Cornu, Laetitia Dablang,
Cécile Delolme, Ghislain Géniaux, Mickaël Hedde, Catherine Mering, Marjorie Musy, Mario Polèse, Christiane Weber

Décembre 2017

Principaux acronymes

ALUR : Loi pour l'accès au logement et à un urbanisme rénové
 CLA : Couche limite atmosphérique
 CLC : Corine Land Cover
 CLU : Couche limite urbaine
 ETM : Eléments traces métalliques et métalloïdes
 GIZC : Gestion intégrée des zones côtières
 HAP : Hydrocarbures aromatiques polycycliques
 JRC : Joint research center
 ICU : îlot de chaleur urbain
 INAO : Institut national de l'origine et de la qualité
 MAJIC : Mise à jour des informations cadastrales
 MES : Matières en suspension
 MOS : Mode d'occupation du sol
 PEAN : périmètres de protection autour des espaces agricoles et naturels périurbains
 PLU/PLUI : plan local d'urbanisme (intercommunal)
 RPF : Référentiel pédologique français
 RUTP : Rejets urbains de temps de pluie
 SAFER : Société d'aménagement foncier et d'établissement rural
 SAU : surface agricole utile
 SCOT : schéma de cohérence territoriale
 SDRIF : schéma directeur de la région Île de France
 SGEU : système de gestion des eaux urbaines
 SRU : Loi relative à la solidarité et au renouvellement urbain
 SUITMA: Soils of urban industrial traffic and military areas
 THR: Très haute résolution spatiale
 UGB : urban growth boundary
 UICN : union internationale pour la conservation de la nature
 ZAU : Zonage en Aires urbaines

Sommaire

Avant-propos.....	5
Introduction : « l'artificialisation des sols », un objet scientifiquement ambigu	7
1. Des méthodes de mesure à l'estimation de l'artificialisation des sols en France	13
1.1. Objets et méthodes de mesure de l'affectation et des changements d'affectation des sols	13
1.1.1. Objet de la mesure	13
1.1.2. Méthodes et données pour mesurer les changements d'affectation des sols et l'artificialisation.....	14
1.2. Mesures et tendances de l'artificialisation des sols en France	17
1.2.1. Les différentes approches de l'artificialisation des sols en France	17
1.2.2. Des estimations très différentes du niveau de l'artificialisation des sols	19
1.2.3. Des tendances d'évolution néanmoins très concordantes	20
1.2.4. Tendances européennes et tendances françaises	23
1.3. Eléments de conclusion et leviers d'action.....	24
2. Les impacts de l'artificialisation sur les caractéristiques et propriétés des sols	25
2.1. Impacts de l'artificialisation sur les caractéristiques physiques, physicochimiques et chimiques des sols.....	25
2.1.1. Spécificités et classification des sols artificialisés.....	26
2.1.2. Caractéristiques et propriétés des sols artificialisés	27
2.1.3. Synthèse sur les caractéristiques physico-chimiques des sols artificialisés.....	32
2.2. Impacts de l'artificialisation sur les organismes et la biodiversité des sols.....	32
2.2.1. Effets sur les différents groupes d'organismes.....	34
2.2.2. Synthèse des effets de l'artificialisation sur la biodiversité des sols.....	35
2.3. Conclusion : des leviers pour limiter les impacts de l'artificialisation sur les propriétés des sols et les conditions de la réversibilité des usages	36
2. 4. Limites des études disponibles et identification des besoins de recherche	38
3. Les impacts de l'artificialisation sur les caractéristiques et le fonctionnement des milieux artificialisés.....	41
3.1. Impacts de l'artificialisation sur les paysages, les habitats et les espèces végétales et animales	41
3.1.1. Méthodologie d'analyse de l'impact de l'artificialisation sur les habitats et la biodiversité.....	41
3.1.2. Effets de l'artificialisation sur les habitats et leur fragmentation.....	42
3.1.3. Effets de l'artificialisation sur les espèces et les communautés végétales	42
3.1.4. Effet de l'artificialisation sur les espèces et groupes d'espèces animales.....	44
3.1.5. Effets spécifiques des infrastructures routières et ferrées et des zones minières.....	45
3.1.6. Conclusion et leviers d'action.....	46
3.1.7. Limites des études disponibles et identification des besoins de recherche.....	46
3.2. Impact de l'artificialisation des sols sur l'hydrologie urbaine et la gestion des eaux pluviales	47
3.2.1. Impacts de l'artificialisation sur l'hydrologie.....	47
3.2.2. Les dispositifs alternatifs de gestion des eaux pluviales	50
3.2.3. Limites des études actuelles et identification des besoins de recherche	51
3.2.4. Conclusion	52
3.3. Impacts de l'artificialisation des sols sur l'environnement physique urbain.....	53
3.3.1. Les impacts sur le microclimat urbain.....	53
3.3.2. Artificialisation des sols et pollution de l'air	59
3.3.3. Les effets acoustiques de l'artificialisation des sols	62
3.3.4 Conclusion.....	65
4. Espace agricole, activité agricole et artificialisation des sols.....	67
4.1. Les impacts directs de l'artificialisation des sols sur la production agricole.....	67
4.1.1. Des pertes de terres agricoles auxquelles contribue l'artificialisation des sols.....	67
4.1.2. Des pertes de terres à l'estimation des pertes de biomasse	68
4.2. La rente foncière agricole, vecteur des changements d'affectation des sols.....	69
4.2.1. Facteurs internes à l'agriculture.....	70
4.2.2. Facteurs externes à l'agriculture.....	70
4.3. Les facteurs locaux de conversion ou de résistance à l'artificialisation des terres agricoles	71
4.4. Les politiques visant à limiter les pertes de terres agricoles par artificialisation.....	73
4.4.1. Le zonage comme outil de préservation des terres agricoles.....	73
4.4.2. Politiques de soutien à la production agricole, déprise et artificialisation des terres agricoles	74
4.5. Conclusions et leviers d'action	75

5. Stratégies de localisation des ménages et construction de logements	77
5.1. Préférences des ménages, extension urbaine et périurbanisation.....	78
5.1.1. L'arbitrage de localisation résidentielle des ménages : entre demande de services résidentiels, préférence pour les attributs des lieux et les voisinages socio-économiques.....	78
5.1.2. De l'étalement urbain à l'émergence des espaces périurbains	79
5.1.3. La périurbanisation des ménages en France	79
5.1.4. Inégalités sociales, configuration urbaine et consommation foncière	80
5.1.5. Conséquences sur les ménages urbains de la périurbanisation des emplois	81
5.2. Le débat sur le rôle des aménités dans l'artificialisation des sols	82
5.2.1. Aménités et équilibre spatial intra-métropolitain, entre zone urbaine et périurbaine.....	82
5.2.2. Rôle des aménités dans l'équilibre spatial entre les villes et/ou entre les régions	83
5.2.3. Les aménités françaises : un facteur d'attractivité internationale.....	84
5.3. Politiques foncières et immobilières susceptibles de limiter l'extension urbaine et périurbaine	84
5.4. L'importance économique et sociale du logement et de la construction.....	86
5.5. Conclusion et leviers d'action	87
6. Les déterminants de l'artificialisation des sols par les entreprises et les infrastructures de transport	89
6.1. Les stratégies de localisation des entreprises et des industries	89
6.1.1. Economies d'échelle et économies d'agglomération, source de l'urbanisation et de la métropolisation.....	90
6.1.2. Répartition des activités au sein de l'armature urbaine et des aires urbaines	91
6.1.3. La dynamique d'implantation des plateformes logistiques, l'exemple d'un secteur fort consommateur de surfaces	94
6.2. Les infrastructures de transport en France.....	96
6.2.1. La remise en question des effets liés aux infrastructures de transport	97
6.2.2. Modèles étudiant l'influence des infrastructures de transport sur l'occupation des sols.....	98
6.3. Conclusion et leviers d'action	99
7. Les spécificités de l'artificialisation des littoraux	101
7.1. L'artificialisation du littoral.....	102
7.2. L'artificialisation de protection contre la mer	103
7.2.1. Les aménagements et leurs effets.....	104
7.2.2. Les options de gestion dynamique du trait de côte et les méthodes "douces"	105
7.3. Les spécificités de l'urbanisation du littoral.....	106
7.3.1. Les déterminants socio-économiques.....	106
7.3.2. Les impacts socio-économiques.....	107
7.4. Les spécificités de la gouvernance du littoral	108
7.5. Conclusion et leviers d'action	109
8. Eviter l'artificialisation des sols ou réduire, voire compenser, ses effets	111
8.1. Les voies juridiques et fiscales de l'artificialisation des sols	111
8.1.1. Les voies juridiques de l'artificialisation	111
8.1.2. Les voies fiscales de l'artificialisation.....	113
8.2. Des leviers pour éviter ou maîtriser l'artificialisation des sols	115
8.2.1. Le zonage : un outil efficace pour éviter localement l'artificialisation des sols.....	115
8.2.2. Eviter l'artificialisation de certains espaces particuliers.....	117
8.2.3. Densifier les espaces déjà artificialisés : une volonté affirmée, des effets bénéfiques relatifs	120
8.3. Des leviers pour réduire les effets de l'artificialisation des sols	121
8.3.1. La connaissance des sols et de l'environnement <i>ante</i> artificialisation : un enjeu pour les politiques publiques	121
8.3.2. Le recyclage du foncier.....	122
8.3.3. La limitation de l'imperméabilisation des espaces artificialisés	123
8.4. Des leviers pour compenser les effets de l'artificialisation des sols	124
8.5. Conclusion.....	125
Auteurs et éditeurs de l'expertise	127

Avant-propos

Formidable réservoir de biodiversité, les sols sont essentiels à de nombreux services écosystémiques tels que la production alimentaire ou la régulation du climat, des crues, de la qualité de l'eau ou de l'air. Face à des demandes croissantes et antagonistes en logement, zones d'activités économiques, infrastructures, nourriture, matières premières, énergie et espaces de nature, cette ressource limitée et non renouvelable aux échelles de temps humaines est soumise à une forte concurrence d'usage et à des pressions qui peuvent en dégrader la qualité ou en limiter la disponibilité. Dans ce contexte, l'« artificialisation des sols » est souvent considérée, voire dénoncée, comme un des principaux facteurs de dégradation des sols et de pertes de terres agricoles mais aussi d'espaces naturels et forestiers.

C'est pourquoi les pouvoirs publics, qui tentent de réguler ce phénomène, ont sollicité une Expertise scientifique collective (ESCo) à l'IFSTTAR et à l'INRA pour proposer un état des connaissances scientifiques disponibles sur les déterminants et les conséquences de l'artificialisation des sols ainsi que sur les leviers d'action qui permettraient d'en limiter l'extension et/ou les impacts environnementaux. Portée par le ministère en charge de l'Environnement (Commissariat général au développement durable, CGDD, Ministère de la transition écologique et solidaire, MTES), l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) et le ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation (Direction générale de la performance économique et environnementale des entreprises, DGPE), cette demande se décline en quatre temps :

- Il s'agit tout d'abord de tenter d'évaluer l'ampleur de l'artificialisation à l'échelle du territoire français, en s'appuyant sur la littérature scientifique, les rapports et études statistiques qui s'y essaient, et de préciser la position de la France par rapport aux autres pays de l'OCDE.
- Au-delà de ces éléments de mesure, la question des déterminants de l'artificialisation des sols et de leur éventuelle hiérarchie est centrale pour comprendre les évolutions de ce changement d'affectation des sols et voir se dessiner les tendances de l'artificialisation.
- Compte tenu des enjeux, il y a lieu d'identifier au mieux les impacts du phénomène tant sur l'environnement biotique et abiotique que sur les conditions de vie des populations et les dynamiques économiques et sociales avec une focalisation spécifique sur les impacts agricoles.
- Enfin, les leviers d'action qui permettraient de maîtriser l'artificialisation des sols et d'en limiter les impacts négatifs, méritent un examen particulier tant ils peuvent être nombreux et convergents ou divergents entre eux ou avec d'autres instruments de politiques publiques.

Pour répondre à ces questions, l'IFSTTAR et l'INRA ont appliqué les principes classiques d'un dispositif d'ESCo (cf. Encadré) qui se fonde sur des références scientifiques internationales certifiées relatives aux divers volets des questions posées. De ce fait, certains phénomènes, en particulier récents, ne peuvent être renseignés précisément, soit faute de travaux publiés, mais aussi parce que les études disponibles ont été conduites dans des contextes trop éloignés des conditions observées en France. Ainsi, cette ESCo a été confrontée à une difficulté peu commune due à la polysémie du terme « Artificialisation des sols ». L'artificialisation des sols (« *Land take* ») telle qu'elle est entendue en France (et en Europe), est avant tout une notion statistique, utilisée en particulier au sein de la base de données *Corine Land Cover*, (CLC) mais son appréhension par les différentes disciplines scientifiques mobilisées pour cette expertise a révélé que les notions d'urbanisation (« *Urbanization* ») ou d'imperméabilisation (« *Soil sealing* ») étaient utilisées préférentiellement. Or, ces trois notions, même si elles se recouvrent en partie ne sont pas exactement synonymes, ce qui, tout en contribuant à la richesse du travail, en a accru la complexité. Par conséquent, la constitution du corpus bibliographique de cette expertise a nécessité de nombreux ajustements et plusieurs combinaisons de mots-clés afin que chaque discipline, approchant le phénomène au travers de concepts différents, puisse disposer d'une base fiable. En outre, les experts se sont livrés, selon les disciplines, à d'importants ajouts de références.

Cinquante-cinq experts francophones, d'origines institutionnelles diverses (Ifsttar, Inra, CNRS, Université de Saint-Etienne, Paris-1, Brest, Montréal, etc.) ont été mobilisés pour l'ESCo "Artificialisation des sols". Certains d'entre eux ont assuré la coordination de chacun des volets de l'expertise et participé aux croisements des points de vue, les autres ayant plus spécifiquement contribué au(x) chapitre(s) relatif(s) à leur strict domaine de spécialité. Les compétences des experts sont, compte tenu de l'ampleur des questions, variées ; elles relèvent de l'économie, de la géographie, de l'écologie, de la pédologie, de l'hydrologie, de l'agronomie, du droit, etc. (la liste de tous les contributeurs et leurs spécialités scientifique sont disponibles à la fin de ce document).

Les résultats de l'expertise sont étayés par un corpus bibliographique de plus de 2 500 références, constitué par deux professionnels de l'information scientifique et technique (Inra et Ifsttar), et composé essentiellement d'articles scientifiques auxquels se sont ajoutés quelques données statistiques, ouvrages et rapports techniques (cf. Annexe). Les experts en ont extrait et assemblé les éléments pertinents pour éclairer les questions posées.

L'ESCo ne fournit ni avis ni recommandation, et n'a pas vocation à proposer de réponses opérationnelles aux questions posées par les gestionnaires. Elle réalise un état des connaissances, le plus complet possible, des déterminants et impacts liés à l'artificialisation des sols en France et tâche d'en identifier les leviers d'action, à travers une approche pluridisciplinaire associant sciences du vivant et sciences économiques et sociales. Elle met en relief les problématiques spécifiques à ce phénomène.

L'expertise scientifique collective (ESCo), principes et méthodes

La présente ESCo, réalisée conjointement par l'Ifsttar et l'Inra, a été conduite selon les principes de l'expertise collective et la démarche mise en œuvre par la Délégation à l'expertise, à la prospective et aux études (DEPE) de l'Inra.

L'expertise scientifique en appui aux politiques publiques

La mission d'expertise en appui aux politiques publiques de la recherche publique a été réaffirmée par la Loi d'orientation de la recherche (2006). L'apport d'argumentaires scientifiques à l'appui de positions politiques est désormais une nécessité dans les négociations internationales. Or, les connaissances scientifiques sont de plus en plus nombreuses et produites dans des domaines très variés, difficilement accessibles en l'état aux décideurs et parties prenantes. L'activité d'ESCo se définit comme une activité d'examen critique et d'assemblage des connaissances disponibles dans des champs très divers du savoir et pertinents pour éclairer l'action publique.

La charte de l'expertise scientifique

Cette activité est régie par la charte nationale de l'expertise de 2011 qui énonce des principes de conduite de l'exercice, dont le respect garantit la robustesse des argumentaires produits. Cette charte énonce quatre principes fondateurs :

- La compétence se décline au niveau des organismes, qui n'engagent des expertises que dans leur domaine de compétences, et au niveau des experts qui sont qualifiés sur la base de leurs publications scientifiques ;
- La pluralité s'entend aussi bien d'un point de vue pluridisciplinaire en associant systématiquement sciences de la vie et sciences humaines et sociales que d'un point de vue disciplinaire en vue de favoriser l'expression des controverses et de l'exercice critique pour une mise en perspective des connaissances. Elle se manifeste également dans la diversité des origines institutionnelles des experts.
- L'impartialité est garantie par la connaissance des liens éventuels des experts avec des acteurs socio-économiques (mentionnés dans une déclaration d'intérêts remplie par chaque expert), et par la diversité du collectif d'experts ;
- Enfin, la transparence se traduit par la production de documents d'analyse et de synthèse mis à disposition de tous.

Définition et fonctionnement de l'ESCo

L'ESCo établit un état des lieux des connaissances scientifiques académiques dont sont extraits et assemblés les éléments pour répondre aux questions posées par les commanditaires. Les questions adressées à l'Inra et à l'Ifsttar ont été énoncées dans un cahier des charges qui est le résultat d'une itération entre les commanditaires et les organismes de recherche, fixant les limites et le contenu de l'expertise. Un comité de suivi, réuni autour des commanditaires, sert d'interface entre les experts et les commanditaires et veille au bon déroulement des travaux. Un comité consultatif d'acteurs, réunissant un ensemble large de représentants des parties prenantes, permet l'expression des enjeux portés par chacun et est un lieu de mise en débat des premiers résultats du travail.

Les experts, réunis en un collectif d'experts animé par un ou plusieurs pilotes scientifiques, rédigent chacun une contribution faisant état des références bibliographiques utilisées. L'ensemble des contributions forme le rapport d'expertise qui est mis en ligne sur le site des organismes de recherche. Les pilotes et experts sont responsables du rapport. Une synthèse et un résumé destinés aux commanditaires et au débat public en sont extraits.

Les organismes de recherche, Ifsttar et Inra, s'engagent sur les conditions dans lesquelles se déroule le processus d'expertise : qualité du travail documentaire, mise à jour des sources bibliographiques, transparence des discussions entre les experts, animation du groupe de travail et rédaction des documents de synthèse et de communication sous une forme qui concilie rigueur scientifique et lisibilité par un public plus large.

Introduction : « l'artificialisation des sols », un objet scientifiquement ambigu

Une notion dont la délimitation statistique reste peu précise ...

Les notions de « sols artificialisés » et « d'artificialisation des sols » se réfèrent respectivement à des modes d'occupation et à des changements d'affectation des sols spécifiques. Elles ont été introduites initialement par les agronomes, qui cherchaient à appréhender les mutations du paysage français en repérant les diverses occupations des sols et leurs changements¹. La démarche visait alors à appuyer l'idée selon laquelle les mutations de l'agriculture « ont façonné le paysage rural »² et à rechercher les causes des pertes de terres agricoles. En termes statistiques, cette démarche s'est traduite par la distinction de quatre grands types d'usage des sols : les usages agricoles, les usages forestiers et les espaces considérés comme « naturels », le solde constituant les « sols artificialisés ». Le terme d'artificialisation des sols a ainsi été construit pour désigner les surfaces retirées de leur état naturel (friche, prairie naturelle, zone humide, etc.), ou de leurs usages forestiers ou agricoles. Ces définitions, principalement formulées par la négative, recouvrent alors tout un ensemble d'usages, d'occupations ou de couvertures des sols aux impacts et déterminants potentiellement fort variés. S'y mélangent des espaces construits et non construits qui ont la caractéristique commune d'être fortement modelés par l'activité humaine (logements, bâtiments industriels mais aussi chantiers, carrières, mines, décharges, etc.) ; y sont également inclus les espaces verts associés à ces usages (parcs et jardins, équipements sportifs et de loisirs...).

En dépit de la simplicité toute relative du principe d'identification des « sols artificialisés » (tout ce qui n'est pas agricole, forestier ou « naturel »), on notera les écarts importants entre les évaluations qu'en font les principales sources statistiques. Ainsi, selon la source du ministère en charge de l'Agriculture (Teruti-Lucas), 9,3 % des sols français sont classés en 2014 dans la catégorie des « sols artificialisés », alors que la source européenne, privilégiée par le ministère en charge de l'Environnement (*Corine Land Cover*), évalue cette part à 5,3 % en 2012. Comme on le verra plus loin, ces écarts s'expliquent relativement aisément par les caractéristiques des méthodes et techniques d'identification de l'occupation des sols. Il n'empêche que l'importance des écarts, associée à des classifications internes à la catégorie qui ne se recouvrent pas, rend mal aisée la manipulation des données relatives à l'artificialisation et donc l'interprétation et la hiérarchisation des causes de l'artificialisation.

... mais d'un usage croissant dans le débat public

En dépit de son flou statistique, la notion « d'artificialisation des sols », appliquée aux usages non agricoles, non forestiers et non « naturels » des sols, fait florès dans les débats publics et les discours politiques. Du fait des importantes perturbations que les interventions humaines font subir à ces sols et à leur environnement et du fait de leur extension continue au détriment le plus souvent de terres agricoles, l'artificialisation des sols est vue aujourd'hui comme une des principales causes de l'érosion de la biodiversité. Elle apparaît, à ce titre, depuis 2015, parmi les 10 « nouveaux indicateurs de richesse » du Gouvernement³, définis à la suite des travaux de la Commission dite « Stiglitz »⁴ : elle y figure aux côtés des indicateurs de croissance, d'emploi, de capital humain, d'inégalités sociales, etc., comme l'un des deux indicateurs à suivre en matière d'impact environnemental de la société française au même titre que l'empreinte Carbone (mesurée par les émissions de gaz à effet de serre). Elle était déjà présente parmi les enjeux de la « Stratégie nationale pour la biodiversité 2011-2020 » et elle faisait partie des sept indicateurs proposés en 2014 par France-Stratégie pour mesurer la « qualité de la croissance »⁵. Il est donc logique de retrouver trace de cette préoccupation dans la feuille de route adressée récemment par le Premier ministre à son Ministre de la transition écologique et solidaire. Il y est demandé à Nicolas Hulot de faire « des propositions avant mi-2018 pour lutter contre l'artificialisation des sols et l'appauvrissement de sols qui sont l'une des principales menaces pour la biodiversité ».

Le plus souvent, la référence dans le débat public au poids et au rôle de l'artificialisation des sols est justifiée par le fait que « l'artificialisation du territoire engendre une perte de ressource en sol pour l'usage agricole et pour les espaces naturels » et suggère de considérer conjointement son rôle dans la dégradation de la biodiversité et dans la perte des terres agricoles. Ce double objectif peut sembler ambigu dans la mesure où la préservation des terres agricoles et celle de la biodiversité ne sont pas nécessairement convergentes : s'il est légitime de chercher à limiter les impacts environnementaux de l'artificialisation des sols, comme de toutes les activités humaines, cet objectif ne passe pas nécessairement et exclusivement par la régulation de l'extension de ces types d'usage.

¹ Slak M.-F., Vidal C. (1995). "Ter-Uti, indicateur de paysage", *Agreste*, cahiers n°21.

² Slak M.-F., Vidal C. (1995). "Les mutations de l'agriculture ont façonné le paysage rural", *Agreste*, cahiers n°21, pp. 47-56.

³ Service d'information du Gouvernement (2015). *Les nouveaux indicateurs de richesse*. Paris : Service du Premier ministre, 74 p.

⁴ Stiglitz J., Sen A., Fitoussi J.-P., coord. (2009). *Rapport de la Commission sur la mesure des performances économiques et du progrès social*. Rapport au Président de la République, Paris : La documentation française, 324 p.

⁵ Ducos G., Barreau B. (2014). *Quels indicateurs pour mesurer la qualité de la croissance ?*, Note d'analyse, Paris : Fr. Stratégie, 12 p.

Quoiqu'il en soit, l'importance prise dans le débat public et les enjeux qui les sous-tendent, confrontés aux difficultés de définir ce qu'est l'artificialisation des sols, nous impose de tenter de préciser dès à présent ce que peut recouvrir cette notion et d'examiner les objets qu'elle englobe. En effet, l'artificialisation renvoie implicitement ou explicitement à deux autres notions, l'imperméabilisation et l'urbanisation. Aucune de ces deux notions, bien que plus proches des concepts mobilisés par les scientifiques, ne recouvre cependant l'ensemble des composantes que la définition statistique cherche à intégrer.

L'imperméabilisation des sols est-elle synonyme d'artificialisation des sols ?

Comme tous les sols artificialisés ont bien subi de fortes perturbations de leurs caractéristiques biophysiques par extraction de matériau, par apports de matériaux exogènes, souvent minéraux, par mélange des différents horizons de sols, par nature de leur couverture, etc., c'est avant tout le sol, en tant que milieu naturel qui va être touché par le changement d'usage. Sa structure, sa chimie et sa biologie sont modifiées avec plus ou moins d'intensité. Ces modifications, associées aux activités qui se développent sur ces sols (que les pédologues classent en SUITMA, *Soils of urban industrial traffic and military areas*), se répercutent également sur la biodiversité (terrestre et aquatique), l'air, l'eau et le cadre de vie humain, tout compartiment susceptible d'être impacté.

Mais, tous ces sols ne subissent pas une imperméabilisation de leur surface au sens où des surfaces importantes de sols dits « artificialisés » ne sont pas recouverts d'une couverture minérale hermétique, ne sont pas « scellés », ne sont pas « minéralisés » pour reprendre la traduction littérale des notions anglo-saxonnes. Ainsi, si on en croit les données de Teruti-Lucas, et en dépit des limitations de ces données qui seront examinées en détail par la suite, plus de 30 % des sols artificialisés étaient en 2014 des « sols enherbés artificialisés ». Ces surfaces importantes (1,6 M² d'ha) correspondent principalement aux espaces verts, aux zones récréatives et de loisirs et aux jardins particuliers associés à l'habitat individuel. On peut sans difficulté supposer que les impacts environnementaux de ces couvertures végétales ne seront pas de même nature que ceux dus à des couvertures minérales de type « sols bâtis » (moins d'1 M² d'ha en 2014) ou de la partie imperméabilisée ou « macadamisée » des 2,5 M² d'ha de « sols revêtus ou stabilisés » qu'ils soient de forme linéaire (voiries et infrastructures de transport) ou de forme aréolaire (parkings, cours d'immeubles, etc.).

Cette clé d'entrée par le degré d'imperméabilisation des sols ou, plus généralement, par le niveau des perturbations subies par le sol est celle qui est privilégiée par les pédologues et la plupart des biologistes. Compte tenu des effets que chaque type de couverture ou de perturbations peut avoir, la façon dont ils se combinent pour former un « paysage » ou une « mosaïque paysagère », constitue également une clé de lecture importante des impacts notamment environnementaux.

L'urbanisation, facteur moteur d'une artificialisation des sols ... qui ne s'arrête pas aux frontières de la ville

Fait majeur de nos sociétés contemporaines, l'urbanisation concerne une part importante des sols artificialisés et est bien sûr un moteur central du processus d'artificialisation et des changements d'affectation des sols qui y sont liés. Néanmoins, même une source comme *Corine Land Cover*, dont on verra plus loin qu'elle prend incomplètement en compte les surfaces artificialisées en zones peu denses (*i.e.*, en zones rurales), met en lumière l'importance des sols artificialisés hors tissus urbains : en effet, cette source considère qu'en 2012, 75 % des sols artificialisés sont localisés en « tissu urbain » continu ou discontinu (soit 2,3 M² d'ha), le reste étant constitué de Zones industrielles ou commerciales, de Réseaux routiers et ferroviaires, d'Extraction de matériaux, de Décharges, de Chantiers, d'Équipement sportifs et de loisirs, etc. probablement plus dispersés sur le territoire. Par ailleurs, les dynamiques urbaines contemporaines, qui associent concentration urbaine, étalement urbain et développement du périurbain) amènent à repenser les liens entre urbanisation et artificialisation.

L'urbanisation, un fait social incontournable

Dans l'histoire de l'humanité, l'urbanisation est un événement à la fois récent et inévitable. Le taux d'urbanisation de la population mondiale vient de passer le cap des 50 %, tandis qu'en France, il frôle aujourd'hui les 80 % d'habitants vivant dans une ville ou « unité urbaine » (Figure 1 et Encadré), un niveau comparable à celui d'autres pays industrialisés. Pour certains pays européens comme la Belgique ou le Danemark, ce taux approche les 90 %. Aucun pays aujourd'hui développé n'a pu échapper à l'urbanisation, quels que furent leurs régimes politiques ou économiques. Et tous les pays émergents ou en développement voient aujourd'hui leur population urbaine et leur taux d'urbanisation s'accroître très rapidement. Le lien entre urbanisation et développement, mesuré habituellement par la croissance, sur longue période, du PIB réel par habitant, fait largement consensus. Historiquement, c'est l'accroissement de la

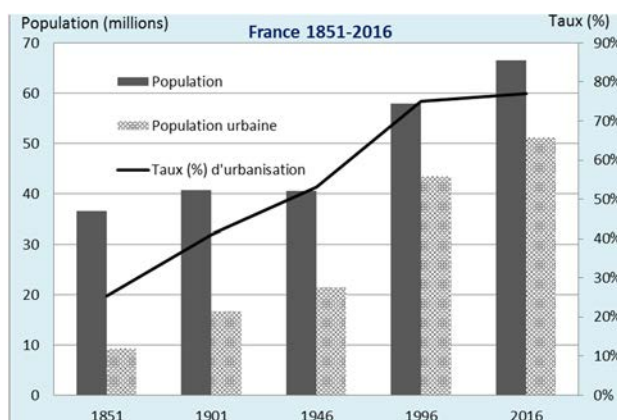


Figure 1. Population, population urbaine et taux d'urbanisation
Source : Insee

productivité agricole et l'apparition d'un surplus agricole qui permettent aux villes de se développer. Les populations qui peuvent s'affranchir de l'agriculture s'implantent à la conjonction de voies de communication (le plus souvent fluviales) et de territoires agricoles suffisamment bien pourvus pour dégager le surplus de production nécessaire à la ville. A l'aube de la révolution industrielle, se met en place le processus de causalité circulaire et cumulative à la base du processus de l'urbanisation contemporaine : les économies d'échelle (internes aux firmes) et les économies d'agglomération (marchandes et non marchandes) dont les entreprises peuvent bénéficier en se rapprochant les unes des autres amènent les firmes industrielles à se concentrer géographiquement soit dans des villes déjà existantes, soit aux abords des ressources naturelles dont elles ont besoin. Ces concentrations attirent alors les populations que les gains de productivité agricole chassent de ce secteur et à la recherche d'emplois. A son tour, l'afflux de nouvelles populations accroît la taille des marchés locaux à la fois de biens et services et du travail, ce qui amène de nouvelles firmes à rejoindre l'agglomération.

Néanmoins, l'agglomération des populations et des activités économiques en un nombre restreint de lieux a une contrepartie : elle se traduit par un renchérissement des prix fonciers. Cette augmentation des prix fonciers agit, dans un premier temps, sur les populations pour qui le logement pèse lourd au regard de leur budget. De ce fait, les villes auront tendance à s'étaler à mesure de la croissance de leur taille, ce qui, d'une part, accroît leur consommation de sols et, d'autre part, fait évoluer leurs formes qui ne se réduisent pas à un point dans l'espace.

L'Europe dans le processus mondial d'urbanisation

Vu d'un point de vue mondial, l'Europe est une région de petites villes, espacées en moyenne d'une quinzaine de kilomètres. Près de la moitié de la population vit dans des agglomérations de moins de 500 000 habitants, ce qui différencie nettement l'Europe des autres continents. Corollairement, la part de population vivant dans les grandes villes de plus de 5 millions d'habitants y est assez faible (inférieure à 5 % contre 10 à 15 % dans d'autres régions du monde ayant des taux d'urbanisation comparables). Même si Paris appartient à la catégorie des mégapoles par sa taille, ni la France ni l'Europe n'ont à gérer de gigantesques concentrations humaines telles que celles qui se sont développées ou se développent dans le nord-est américain, au Japon, ou dans les grands deltas chinois.

L'Europe se distingue également par ses densités urbaines moyennes : par rapport aux autres continents, celles-ci se trouvent en position intermédiaire entre l'extrême dilution des villes nord-américaines et les fortes densités des villes asiatiques. L'ordre de grandeur de ces densités moyennes est ainsi d'environ 2 000 habitants au km² pour les villes d'Amérique du Nord, de 10 000 à 40 000 hab./km² pour les villes asiatiques, et de 4 000 hab./km² pour les villes européennes.

L'étalement urbain, corollaire de la métropolisation

L'expansion des villes s'effectue selon deux processus contradictoires en fonction de l'échelle géographique d'observation. A l'échelle nationale ou continentale, la métropolisation dessine une concentration relative des formes sociales et productives dans les plus grandes villes. A l'échelon local, la dominante est à l'étalement du fait de l'accroissement du prix du foncier qu'engendre la concentration. Deux grandes formes d'étalement urbain peuvent être distinguées : dans la première, la ville s'étend en repoussant plus loin ses propres frontières urbaines, les nouvelles constructions s'inscrivant dans la continuité des constructions préexistantes ; dans la seconde, l'étalement se fait en discontinuité, les populations ou les entreprises allant résider dans des villages assez proches de la ville (pour pouvoir aller y travailler) mais assez lointains pour ne pas rentrer en continuité avec la ville (Figure 2). C'est ce double phénomène d'étalement urbain qui, en France, a amené l'INSEE à élaborer son Zonage en aires urbaines (ZAU) en complément de sa distinction unités urbaines – communes rurales (cf. Encadré). Dans un second temps, le prolongement du mouvement de métropolisation peut également induire une extension des aires d'étalement urbain autour de centres périphériques secondaires qui étaient anciennement "autonomes" (Figure 2).

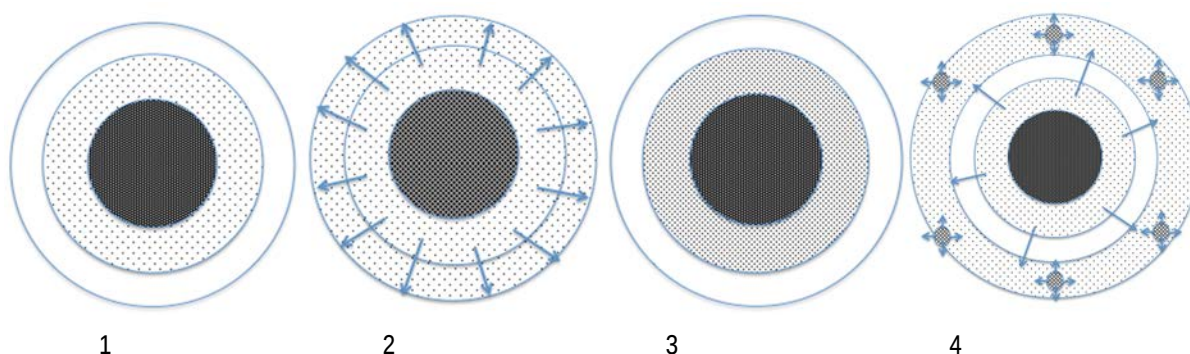


Figure 2. Illustration du phénomène de "Leapfrog", littéralement "dépasser" en français, qui schématise les formes d'étalement urbain. Les gammes de gris, du plus foncé au plus clair correspondent à la densité de population, de la plus haute à la plus basse.

1 : Situation de départ ; 2 : Étalement par extension urbaine ; 3 : Étalement par densification de la périphérie ;

4 : Étalement par extension des bourgs secondaires (© Gilli, 2017)

Encadré : Unités urbaines ; Pôles (urbains) et leur couronne vus par l'INSEE

Dès 1954, l'INSEE, via sa préoccupation de distinguer espaces urbains et espaces ruraux, introduit la notion d'unité urbaine qui combine continuité du bâti et nombre d'habitants agglomérés. Une unité urbaine est alors définie comme une commune ou un ensemble de communes qui présente une zone de bâti continu (pas de coupure de plus de 200 mètres entre deux constructions) et qui compte au moins 2 000 habitants. Toute commune appartenant à une unité urbaine est elle-même urbaine, les autres étant dites communes rurales.

Au tournant des années 1990, il est apparu nécessaire, pour rendre compte des conséquences géographiques de l'étalement urbain, de compléter cette dichotomie urbain-rural par un « Zonage en Aires urbaines » (ZAU). Celui-ci a déjà fait l'objet de deux versions (1996 et 2010).

Dans la version de 2010, les Pôles urbains sont constitués du sous-ensemble des unités urbaines qui offrent au moins 10 000 emplois (et qui ne sont pas situées dans la couronne d'un autre pôle urbain). Sont également repérés des Moyens pôles, unités urbaines de 5 000 à 10 000 emplois, et les Petits pôles, unités urbaines de 1 500 à moins de 5 000 emplois.

Autour de ces pôles, ont été identifiées des Couronnes ou aires d'influence de ces pôles. Il s'agit de l'ensemble des communes rurales ou unités urbaines (d'un seul tenant et sans enclave), dont au moins 40 % de la population résidente ayant un emploi travaille dans le pôle ou dans des communes attirées par celui-ci.

Les aires, rassemblant chacune un pôle et sa couronne, sont réparties en trois catégories : les « Grandes aires urbaines », qui regroupent Pôles urbains et leurs couronnes périurbaines, les « Moyennes aires », autour des moyens pôles, et les « Petites aires », autour des petits pôles.

Enfin, parmi les communes non incluses dans les aires, certaines envoient 40 % au moins de leurs actifs résidents travailler dans un ensemble d'aires, sans atteindre ce seuil avec une seule d'entre elles. Au sein de ces communes, appelées multipolarisées, on distingue les communes multipolarisées des grandes aires urbaines, dont 40 % au moins des actifs résidents travaillent dans plusieurs grandes aires urbaines, et les autres communes multipolarisées.

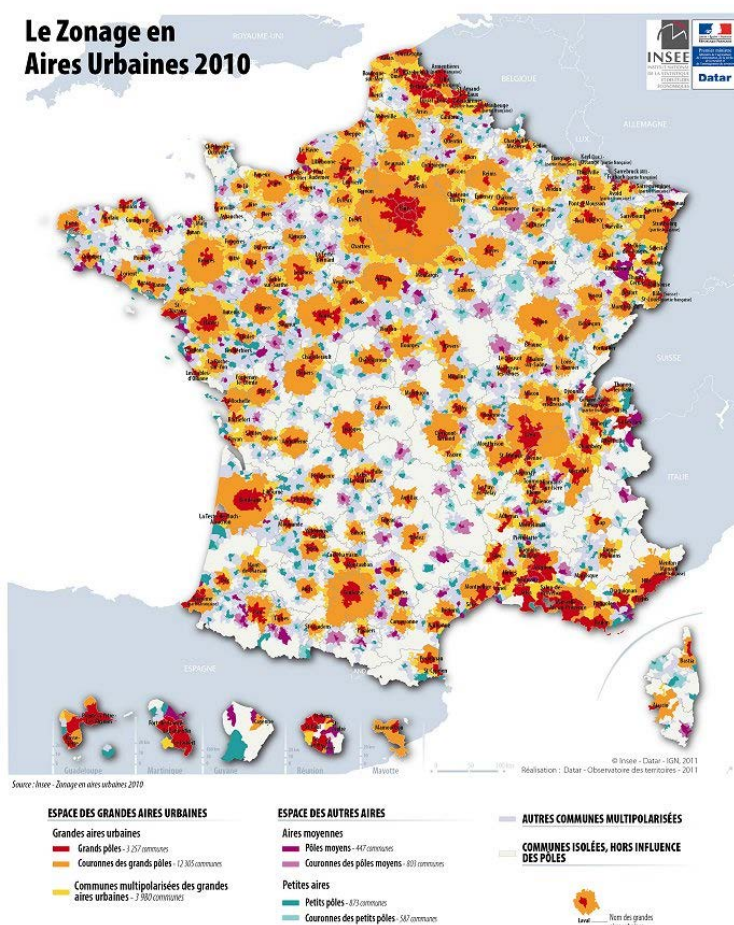


Figure 3. Le zonage en aires urbaines de l'Insee, version 2010.

La première forme d'étalement urbain agrandit donc la surface de la ville et étend ses frontières : l'artificialisation des sols qui s'y produit, est clairement inscrite dans l'urbanisation. La seconde densifie les espaces périphériques qui, sans devenir urbains, n'en restent pas pour autant ruraux mais deviennent périurbains. Dans ce cas, l'artificialisation des sols qui en découle est bien liée au processus d'urbanisation mais elle se déroule sur des communes externes à la ville, vue comme un espace de continuité de bâti.

Ce processus de desserrement urbain par périurbanisation est intervenu, en France et en Europe, à une date relativement tardive (les années 1960). Il semble en cours de ralentissement, le paroxysme du mouvement étant intervenu avant les années 2000. En une trentaine d'années, entre le début des années 1970 et la fin du XX^e siècle, il a transformé les équilibres démographiques entre zones urbaines et périurbaines et les paysages français, notamment périurbains. Le territoire aujourd'hui placé sous influence urbaine couvre une large part du territoire national (seules 7 400 des 36 700 communes françaises en sont exclues) et accueille 95 % de la population métropolitaine (Figure 3). Si près de 50 millions des français vivent aujourd'hui dans un pôle, ils sont près de 22 millions à résider dans une commune périurbaine, placée le plus souvent sous l'influence d'un (ou de plusieurs) des 241 grands pôles urbains⁶. L'écart de densité démographique entre les pôles et les couronnes vers lesquelles ils s'étendent, est conséquent : de 820 hab./km² dans les grands pôles urbains, la densité de population passe à 72 hab./km² dans les couronnes de ces mêmes pôles, posant très vraisemblablement en termes différents les questions de l'artificialisation des sols qui s'y déroule.

Concernant initialement les populations qui cherchaient résidence en dehors des villes tout en continuant à travailler dans celles-ci, le mouvement d'étalement urbain s'est progressivement propagé aux entreprises (commerciales, d'abord, logistiques ensuite, puis industrielles) qui aujourd'hui tendent à repositionner leurs implantations nouvelles dans les espaces périurbains.

En outre, entre les villes et au sein de leurs aires, s'est développé un réseau d'infrastructures de transport (ferroviaire et routier) dense qui vise tant l'amélioration de la desserte des espaces périurbains que les liaisons interurbaines. L'artificialisation qui en est issue, touche donc également des espaces ruraux plus lointains (i.e. non périurbains), et associe alors à d'autres types d'artificialisation, liés au développement d'activités touristiques et de loisirs, de résidences secondaires qui y sont liées, d'entreprises industrielles et commerciales qui y trouvent certains avantages.

* *

*

Ainsi, l'artificialisation des sols n'est réductible ni à l'imperméabilisation d'une partie de ceux-ci, ni à l'urbanisation pris au sens strict du terme. Aucune de ces deux approximations ne permet de prendre en compte toutes les dimensions que recouvre la définition statistique de cette notion. Ses composantes sont multiples et complexes ; l'analyse de ses causes et conséquences le seront alors tout autant. Pour tenter d'y voir clair, il apparaît nécessaire de se doter d'une grille d'analyse qui peut servir de grille d'interprétation des résultats scientifiques ou peut permettre de les repositionner dans le(s) contexte(s) concret(s) de la France. De l'analyse qui précède, il ressort que les causes et conséquences de l'artificialisation, les leviers d'action qui pourraient en limiter les impacts négatifs et/ou l'extension, doivent être appréhendés selon les **trois grandes dimensions** suivantes :

- La **nature des perturbations subies et de couverture du sol** après son « artificialisation » (imperméabilisation, minéralisation, couverts végétaux, etc.), à laquelle il convient d'associer la façon dont il s'agence localement avec des sols artificialisés de couverture différente, c'est-à-dire la mosaïque paysagère dans laquelle il s'inscrit ;
- Son **positionnement dans la trame urbaine** (centre de villes denses, banlieues, zones d'extension des frontières de la ville, communes périurbaines, communes hors des influences urbaines) ;
- Le **type d'activités qui s'y déploient** (habitat individuel ou collectif ; activités industrielles et leur nature ; activités tertiaires ; activités commerciales et logistiques ; infrastructures de transport ; etc.).

C'est à partir de la prise en compte simultanée de ces trois dimensions que doivent être lus les résultats scientifiques qui suivent, sachant que, pour évaluer les impacts du changement d'affectation du sol vers l'artificialisation, il y a lieu de tenir compte également des caractéristiques du sol avant son artificialisation.

En vue de prendre plus directement en compte les termes dans lesquels est actuellement posé le débat sur l'artificialisation des sols, la présente synthèse a pris le parti d'une structure plus directement liée aux enjeux. Après un examen critique des méthodes de mesure de l'artificialisation des sols et des résultats qui en sont issus dans le cas français (chapitre 1), on se concentre tout d'abord sur les impacts environnementaux de l'artificialisation, en tentant de se limiter aux effets les plus directs de l'artificialisation des sols sur l'environnement. En effet, les sols artificialisés supportant l'ensemble des activités économiques et sociales, non agricoles et non forestières, il y a lieu d'éviter d'attribuer à la seule artificialisation des sols *tous* les impacts de *toutes* les activités humaines (non agricoles et non forestières) dont ces sols sont simplement le support. Un premier focus porte sur les effets très directs de l'artificialisation sur les sols eux-mêmes tant du point de vue de leurs

⁶ Brutel C., Levy D. (2011). Le nouveau zonage en aires urbaines de 2010. *Insee Première*, 1374 : 1-4.

propriétés physico-chimiques que du point de vue de la biologie des sols (Chapitre 2). Le point de vue est ensuite élargi aux **impacts des milieux artificialisés sur leur environnement**, en abordant successivement les effets directs sur la biodiversité terrestre, la fragmentation des paysages et l'hydrologie urbaine, puis quelques-uns des effets indirects sur le climat urbain, sur les pollutions atmosphériques et sonores de cet environnement (Chapitre 3). La prise en compte de ces quelques effets indirects, inscrite au cahier des charges de l'ESCo, peut être vue ici comme l'exploration de certains des effets négatifs de l'urbanisation que les ménages peuvent chercher à éviter en se périurbanisant, accentuant ainsi les changements d'usage des sols dans les espaces périurbains. Une attention particulière est portée aux **effets directs et spécifiques de l'artificialisation des sols sur le secteur et l'activité agricoles**, notamment dans les franges urbaines et les espaces périurbains : perte de terres agricoles, réduction des capacités productives, pression foncière et conditions d'exercice de l'activité agricole (Chapitre 4). Les déterminants et impacts économiques et sociaux de l'artificialisation ne sont examinés que dans un second temps et s'organisent autour des **stratégies de localisation résidentielle des ménages** et de la **demande en construction de logements** qui en découle (Chapitre 5), puis des stratégies de localisation des **activités économiques** avec deux illustrations spécifiques : l'une relative à la construction d'entrepôts et plateformes logistiques ; l'autre aux infrastructures de transport (Chapitre 6). L'**artificialisation du littoral**, espace qui concentre et cristallise les manifestations et déterminants observés à l'échelle nationale, appelle à une prise en compte particulière (Chapitre 7). Enfin, sont examinées les **réponses que les politiques publiques peuvent apporter à l'artificialisation des sols** (Chapitre 8).

1. Des méthodes de mesure à l'estimation de l'artificialisation des sols en France

Compte tenu des écarts entre les sources françaises sur les surfaces artificialisées et leurs évolutions récentes, il est nécessaire, en tout premier lieu, de faire le point sur les approches et les méthodes qui permettent ce type de mesure et sur la façon dont elles sont mobilisées par la statistique publique pour en comprendre les incertitudes et les limites (1.1). C'est sur ces bases que l'on pourra comprendre les écarts relevés entre les sources au niveau français et être en mesure d'analyser le poids et la nature des sols artificialisés et les tendances d'évolution de l'artificialisation en France tout en replaçant ces tendances dans un contexte européen (1.2). En dépit des écarts sur l'évaluation du taux d'artificialisation, toutes les sources convergent pour conclure à une tendance à l'augmentation de l'artificialisation tant en France que sur le territoire européen.

1.1. Objets et méthodes de mesure de l'affectation et des changements d'affectation des sols

Aucune des méthodes qui permettent d'identifier les sols artificialisés et d'appréhender l'artificialisation des sols, ne vise directement cet unique objectif. Toutes ont, par essence, vocation à appréhender l'ensemble d'un territoire et d'y examiner les différents types d'affectation des sols qui le composent et les changements d'affectation de ces sols. C'est donc par adaptation de la catégorisation des affectations des sols que sera repérée l'artificialisation des sols, comme catégorie d'une typologie des usages, elle-même composée d'éventuelles sous-catégories. C'est sur ces méthodes d'analyse de l'affectation des sols et sur leur capacité à cerner les sols artificialisés que nous nous penchons ici, après avoir précisé les objets qui concernent plus particulièrement l'artificialisation.

1.1.1. Objet de la mesure

Les "objets" mesurés sont associés à plusieurs échelles spatiales qui se focalisent sur plusieurs types d'éléments allant du bâtiment, à la parcelle, à l'ilot, au quartier, à l'agglomération voire à la tache urbaine. La mesure de l'artificialisation renvoie à trois objets : les surfaces, la tache urbaine et le changement d'état.

- Les surfaces

Par définition, les surfaces artificialisées sont des surfaces retirées de leur état « naturel », forestier ou agricole, qu'elles soient bâties, revêtues ou non. Elles incluent les sols bâtis à usage d'habitation ou à usage industriel ou commercial (bureaux, usines...), les sols revêtus ou stabilisés (routes, voies ferrées, aires de stationnement, ronds-points, etc.), et d'autres espaces non construits mais fortement perturbés par l'activité humaine (chantiers, carrières, mines, décharges, etc.). Cette catégorie inclut également des espaces verts artificialisés (parcs et jardins urbains, équipements sportifs et de loisirs, etc.). Les surfaces artificialisées se distinguent, entre elles, par leur degré d'imperméabilisation et la nature des perturbations que leurs sols ont subies. On notera bien que certaines zones dites non artificielles sont imperméables et que des zones dites artificielles sont parfaitement perméables.

- La tache urbaine

La tache urbaine désigne le contour de l'expansion urbaine. Le large recours à cette notion, notamment dans les approches mobilisant la télédétection, s'explique par sa facilité de calcul, souvent à partir d'images Landsat gratuites. Grâce à la disponibilité d'images à haute résolution SPOT avec un capteur panchromatique à 10 m, la limite de cette tache urbaine a fait l'objet d'une série d'analyses afin de mieux rapprocher les définitions statistique et satellitaire. La tache urbaine – terme à connotation négative mais qui renvoie bien à la technique du traitement d'image où l'on perçoit une tache grisâtre – est une composante majeure de la couverture du sol et un indicateur de l'utilisation du sol. Elle est retenue comme une variable importante dans de nombreuses études urbaines ou environnementales. La tache urbaine ne décrit pas la totalité de l'artificialisation puisqu'elle se focalise sur l'espace urbanisé, et omet, par exemple, les nombreuses infrastructures de transport qui relient les taches urbaines.

- Le changement d'affectation des sols, l'artificialisation

L'artificialisation considère les modifications des surfaces initiales en espaces artificialisés (transformés pour un usage non agricole) sur un pas de temps donné. Plusieurs éléments peuvent être observés : la localisation, le type et les rythmes de ces changements. Au vu de la littérature scientifique, relativement peu d'exemples se fondent sur une comparaison de plus de

deux dates, alors que cela permettrait d'observer des trajectoires et des rythmes de croissance. Les limites de telles approches sont autant méthodologiques que techniques et financières, bien que l'ouverture récente d'images d'archive gratuite a créé un réel engouement pour des travaux sur séries temporelles.

1.1.2. Méthodes et données pour mesurer les changements d'affectation des sols et l'artificialisation

Parmi les différentes méthodes mobilisables pour repérer les sols artificialisés et étudier l'artificialisation des sols, le traitement d'images satellitaires est largement utilisé pour la production de données à l'échelle européenne et mondiale, mais les méthodes de la télédétection ne sont pas dédiées à la mesure de l'artificialisation. Elles participent en revanche à une connaissance de l'occupation des sols. En France, les méthodes et données mobilisées pour mesurer l'artificialisation du territoire varient selon l'échelle de mise en œuvre (nationale, régionale, locale), l'échelle de restitution (du niveau parcellaire à national) et les objectifs visés (suivi exclusif de l'artificialisation, carte d'occupation du sol, statistiques agrégées).

Malgré une diversité d'approches, la mesure de l'artificialisation constitue rarement la finalité première de la méthode ou des données mobilisées. Il s'agit donc bien souvent d'adapter des outils, données et méthodes à un concept encore polysémique, voire d'extrapoler une information.

1.1.2.1. Les méthodes de télédétection : diversité, intérêt et limites

• Les données de télédétection

La plupart des travaux portant sur la mesure de l'urbanisation, de l'imperméabilisation des sols ou des changements d'occupation du sol par télédétection ont été réalisés à l'aide de séries d'images Landsat (MSS, TM, ETM+, OLI). Il n'existe pas de produit unique permettant de mesurer l'artificialisation, et le choix dépend de l'adéquation des spécificités des images disponibles (résolutions spatiale, temporelle, radiométrique, spectrale ; profondeur temporelle, etc.) aux objectifs recherchés (caractérisation du type de surface ou de la tache urbaine, évaluation des dynamiques). Les travaux de recherche à partir de méthodes de télédétection et d'images à moyenne résolution ont tendance à surestimer les surfaces imperméabilisées et les résultats ne peuvent pas être exploités à une échelle plus locale d'analyse du territoire à cause de la résolution spatiale trop grossière de ces images.

On compte trois types de méthodes principales de traitement d'image : celle liée aux capteurs optiques et aux radars, celle liée aux capteurs à très haute résolution spatiale (THR), ou encore la méthode de fusion d'images multi-sources et multi-résolutions. Les radars sont utiles pour percevoir les terrains en zone nuageuse (indispensable par exemple sur l'équateur ou les pôles). Les capteurs à très haute résolution spatiale permettent de quantifier avec précision la densité du bâti, l'interface entre celui-ci et le milieu naturel, ou encore les formes du bâti en relation avec leurs usages. Certaines des données ainsi collectées permettent notamment d'obtenir l'information d'altitude pour les bâtiments et donc la possibilité de mesurer la densification des zones urbaines. Enfin, les méthodes de fusion d'images permettent d'exploiter simultanément des images provenant de capteurs différents. La technologie de télédétection active lidar peut ainsi être utilisée comme moyen d'estimer la hauteur des bâtiments dans un objectif de détection de changements en trois dimensions et d'estimation de la densification urbaine.

• Les méthodes de traitement des images satellitaires

Méthodes de classification. La classification permet de ranger des pixels selon une nomenclature. La classification est souvent multi-spectrale et les méthodes sont dites dirigées, parce qu'elles utilisent des méthodes d'apprentissage en amont, comme celle du Maximum de Vraisemblance (LM), du Support Vector Machine (SVM) ou encore de la Distance Minimale. Celles non dirigées sont utilisées plus rarement (ISODATA ou KMEANS). Pour accompagner ces classifications et compléter l'interprétation des résultats, divers indices sont calculés. Il peut s'agir de la végétation, de la brillance, du bâti, de l'humidité du sol, des indices morphologiques ou de paysage, etc. Le recours à d'autres données spatiales comme les modèles numériques d'élévation, ou à des données géographiques de référence, ou encore à des photographies aériennes sert souvent à enrichir ou valider localement les résultats.

Méthodes orientées Objets. Depuis les années 2000, la communauté scientifique a été conduite à envisager des méthodes de classification où les unités à classer ne se réduiraient pas aux seuls pixels de l'image, mais à des groupes de pixels qui peuvent être décrits non plus seulement par leur luminance spectrale, mais également par leur texture et leur géométrie. Ces approches, regroupées sous le nom de Méthodes Orientées Objets sont de plus en plus souvent utilisées avec les images THR. Elles ont été également récemment appliquées à des images à moyenne et haute résolution spatiale de type Landsat, IRS, RapidEye ou SPOT pour extraire les surfaces urbaines dans des pays dont les villes ont de fortes dynamiques urbaines, tels que l'Inde, la Chine ou les Etats-Unis. La tendance est au développement de méthodes hybrides qui combinent à la fois des méthodes pixels et objets.

Méthodes évoluées. Des approches telles que les Réseaux de Neurones ou les Automates Cellulaires permettent d'intégrer des connaissances expertes pour mieux caractériser le territoire. Le développement d'indices synthétiques issus de la combinaison des mesures de luminance dans le visible et l'infrarouge (indices de végétation, de brillance, du bâti, d'humidité du sol) a incité certains auteurs à réaliser également les classifications par étape au moyen du seuillage de chacun des indices afin de contrôler progressivement la discrimination des différents états de surfaces (sols nus, eau, végétation naturelle ou cultivée, bâti...) qu'ils cherchaient à reconnaître. Ce type d'approche est regroupé sous la dénomination "d'arbre de décision".

Les travaux qui, après avoir identifié les surfaces bâties sur les images, visent à caractériser les organisations spatiales du bâti et leurs évolutions spatio-temporelles (densification, étalement, etc.), mobilisent des méthodes d'analyse texturale ou inspirées de l'Ecologie du Paysage.

• La photo-interprétation d'images satellitaires ou aériennes

L'interprétation d'images consiste à demander à des experts de saisir la nature de l'occupation des sols grâce à des supports et à leur connaissance du domaine. Les images sont d'abord rectifiées et mises dans un système de projection (orthoimage) puis la saisie est réalisée. Des outils de traitement d'images sont souvent utilisés pour faciliter la définition du contour des zones. Le cas emblématique est la réalisation de la base de données CLC, fortement mobilisée au niveau européen.

Corine Land Cover est une base de données européenne d'occupation biophysique des sols. Ce projet est piloté par l'Agence européenne de l'environnement et couvre 39 États. L'inventaire CORINE Land Cover et les couches thématiques d'occupation des sols haute-résolution sont des bases de données géographiques pan-européennes, mises à disposition par le service Territoire, du programme européen d'observation de la Terre Copernicus. En France c'est le service SoeS du ministère de la Transition écologique qui est chargé de sa réalisation. Cette base vectorielle qui compte quatre versions (1990, 2000, 2006 et 2012) est produite par photo-interprétation humaine d'images satellitaires (Landsat, SPOT, IRS, etc.) d'une précision géométrique de 20 à 25 m.

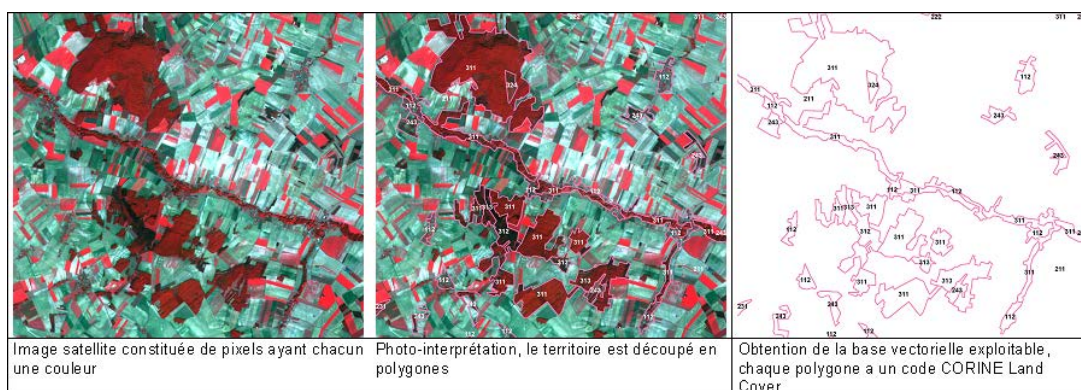


Figure 1-1. Schéma de principe de la photo-interprétation

© SOeS — Travail personnel, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6317890>

CLC privilégie l'occupation biophysique du sol à son utilisation, en classant la nature des objets (cultures, forêts, surfaces en eau...) plutôt que leur fonction socio-économique. Elle s'articule suivant trois niveaux, avec 44 postes au niveau 3, 15 postes au niveau 2 et 5 postes au premier niveau. Au premier niveau, le poste 1 décrit l'artificialisation. Il contient : les Zones urbanisées (Tissu urbain continu et Tissu urbain discontinu), les Zones industrielles ou commerciales et réseaux de communication (Réseaux routier et ferroviaire et espaces associés, Zones portuaires, Aéroports), les Mines, décharges et chantiers (Extraction de matériaux, Décharges, Chantiers), les Espaces verts artificialisés non agricoles (Espaces verts urbains, Équipements sportifs et de loisirs). Les données CLC visent donc une appréhension détaillée de l'artificialisation.

Les bases complètes découpent le territoire en polygones de plus de 25 hectares ayant chacun un code de la nomenclature et les bases de changements cartographient les changements de plus de 5 hectares intervenus entre deux dates. Chaque polygone de changement contient le code d'occupation du sol initial et final. CLC offre une base de données gratuite disposant d'une profondeur temporelle et d'une couverture européenne accessible au format vectoriel. En revanche, les seuils qu'elle emploie sont élevés, ce qui, en dépit de leur amélioration régulière, limite la précision spatiale, notamment dans les zones peu denses.

1.1.2.2. Les enquêtes statistiques de terrain

Les enquêtes statistiques sont basées sur l'observation directe sur le terrain de l'occupation du sol sur un nombre défini de placettes d'observations et nécessite donc la définition d'échantillons sur lesquels sont réalisés ces relevés précis (Encadré 1-1). Les résultats sont ensuite extrapolés sur un territoire plus large. Comme les précédentes, ces enquêtes n'ont pas pour objet premier de mesurer l'artificialisation, mais de connaître l'utilisation du sol.

L'intérêt de ces méthodes est que l'échantillonnage permet de réduire les coûts et de réaliser des enquêtes régulières pour étudier l'évolution d'un phénomène (ici, l'occupation du sol). Un autre avantage concerne la faible taille de l'unité d'observation, qui permet de rendre compte d'occupations – et de changements d'occupation – des sols mal ou peu détectés par télédétection. L'inconvénient est que l'extrapolation peut être sujette à question lorsque la population est hétérogène, comme c'est le cas pour l'occupation du sol métropolitain. L'échantillonnage est interrogeable au niveau de la répartition des points, de leur nombre et de leur espacement ainsi qu'au niveau de l'étendue de l'unité d'observation notamment lorsque les phénomènes que l'on veut mesurer s'étendent sur de faibles surfaces (comme ce peut être le cas de l'artificialisation dans certaines espaces). Par ailleurs, ce type de méthode est plus sensible au biais d'interprétation de la part de l'observateur que les précédentes : elles requièrent un protocole très structuré et un personnel bien formé pour assurer l'homogénéité des résultats, surtout lorsqu'il s'agit de données difficile à interpréter.

Encadré 1-1 - L'enquête de terrain Teruti-Lucas en France

L'enquête est fondée sur un échantillon, en métropole, de l'ordre de 300 000 placettes d'observation (3 m de diamètre étendu à 40 m en cas d'occupation naturelle hétérogène), distribuées en 30 000 grappes (ou segments) environ, distantes de 6 km (3 km en Ile-de-France, 2 km en outre-mer). Chaque grappe (taille de 1,5 km x 600 m à 1,5 km x 1,5 km) comporte en général 10 placettes (25 en outre-mer et Ile-de-France), distantes de 300 m. Les placettes sont toutes géolocalisées, mais leurs coordonnées ne sont pas accessibles pour des raisons de confidentialité. Chaque année, environ 700 enquêteurs terrain sont recrutés, formés et pilotés par les services régionaux de l'information statistique et économique (SRISE) entre mai et juillet pour observer et caractériser 185 000 placettes, selon une nomenclature de collecte constituée de 122 postes d'occupation du sol et 38 postes d'usage du sol. Les méthodes ont régulièrement été améliorées pour tenter de corriger les défauts dus à l'échantillonnage⁷.

1.1.2.3. La valorisation des fichiers et bases de données administratives

Les fichiers fonciers sont directement issus du cadastre fiscal couvrant le territoire national. Le Cerema, qui les met en forme et les diffuse pour le compte du Ministère en charge de l'environnement, a mis en œuvre une méthode permettant de déterminer l'évolution annuelle des espaces naturels, agricoles et artificiels entre 2006 et 2015 à l'échelle de la parcelle mais communiquées à une échelle communale. Les données du marché foncier des SAFER (Société d'Aménagement Foncier d'Etablissement Rural) renseignent, quant à elles, sur la mutation de terres agricoles vers un usage non agricole s'inscrivant généralement dans une dynamique d'artificialisation.

La nouvelle génération de données vectorielles sur le cadastre permet d'avoir une couverture quasi-exhaustive des contours des parcelles et des polygones bâtis (Données des Plans Cadastraux Informatisés PCI et BDPARCELLAIRE© de l'IGN). Ces données sont disponibles annuellement et couvrent petit à petit le territoire. La plupart des services géomatiques des collectivités territoriales qui s'intéressent à la mesure de l'étalement urbain, avaient pour pratique d'améliorer les couches issues de données satellitaires types CLC, en utilisant ces données pour mieux évaluer et qualifier la consommation d'espace relative à l'urbanisation⁸ et en les complétant par les données de la BDTopo de l'IGN pour les données d'infrastructures. Ces données peuvent être liées aux fichiers fonciers de l'Etat (fichiers MAJIC⁹) qui regroupent des informations très détaillées sur les propriétaires de biens fonciers et immobiliers, ainsi que sur les caractéristiques des biens bâtis et des parcelles. Aujourd'hui, elles peuvent utiliser les fichiers cadastraux du Cerema lors qu'elles n'ont pas de MOS (Mode d'occupation du sol).

La possibilité de s'appuyer sur plusieurs millésimes du PCI permet d'atteindre un taux d'erreur inférieur à 0,01 % (projet Urbansimul¹⁰). Coupler ces deux sources de données permet de distinguer les types de bâtis entre logements et locaux professionnels, de qualifier la propriété et les propriétaires qui sont des variables centrales de la dynamique d'artificialisation. Ils permettent également de distinguer bâti dur et bâti léger, ce qui peut être très utile pour apprécier la réversibilité des constructions. Autres sources vectorielles récentes, les documents d'urbanisme au format CNIG/COVADIS au 1/5000^e permettent de qualifier le caractère constructible des parcelles et de connaître les règles précises de constructibilité en vigueur. Ces documents couvrent le territoire français de façon très hétérogène, mais évoluent très vite (en PACA en 2017, plus de 50 % des communes sont couvertes).

⁷ Pour une analyse de cette méthode, consulter le rapport de B. Virely, "Artificialisation, de la mesure à l'action", Thema, CGDD, 2017.

⁸ Les routes, comme le bâti diffus, sont difficilement repérables avec de la télédétection sans passer par de la très haute résolution. Les données vectorielles issues de BDTopo de l'IGN fournissent une des autres principales sources de données complémentaires pour prendre en compte ce type d'artificialisation et sont fréquemment utilisées par les services d'urbanisme des collectivités territoriales pour l'amélioration des MOS.

⁹ On parle également de documentation foncière ou de documentation littérale du cadastre.

¹⁰ <https://urbansimul.paca.inra.fr/urbansimul>

L'utilisation croisée de telles données vectorielles permet d'analyser le processus d'artificialisation à l'échelle de l'unité spatiale de décision, c'est-à-dire la parcelle ou le lot de parcelles, tout en disposant des principaux descripteurs des biens et des propriétaires et en permettant l'analyse des interactions avec les zonages d'urbanisme qui sont censés réguler le phénomène et le marché foncier et immobilier.

1.1.2.4. Les approches par modélisation rétrospective ou prospective

La modélisation prospective de l'artificialisation est une pratique récente et en pleine expansion destinée à éclairer les décideurs quant aux impacts possibles en termes de consommation de l'espace, des formes futures de la tache urbaine et de ses conséquences socio-économiques et environnementales, de stratégies ou d'absence de stratégie de planification à moyen ou long terme. Les analyses des changements passés (rétrospectives) sont une étape préalable à l'exploration de l'urbanisation future à l'aide de modèles de simulation spatiale. La plupart des études utilise des données historiques d'occupation du sol pour calibrer et valider ces modèles. Une fois qu'ils sont calibrés, la validation des modèles est réalisée en simulant l'urbanisation sur une période passée et en comparant les résultats issus de la simulation avec la situation observée pour une même date. Pour plus de 80 % des articles, les modèles utilisés reposent sur l'approche « individus centrée » à partir d'automates cellulaires (SLEUTH, CA-Markov, Land Change Modeler, CLUE, MOLAND, etc.) bien qu'un nombre non négligeable opte pour des modèles « multi-agents ». La plupart des études ont des visées prospectives de l'ordre de 20 à 30 ans et, plus rarement, à des horizons plus lointains tel que 2100. D'autres sont plus prédictives et visent à repérer les espaces où l'urbanisation est susceptible d'avoir lieu à court terme. Ces modèles peuvent intégrer des données complémentaires telles que de futurs réseaux de transport ou traduisant des stratégies de planification future pour produire des scénarios plus ou moins contrastés. Leur disponibilité n'est pas toujours assurée, ce qui est en particulier le cas des données socio-économiques et on observe un recours relativement systématique à des données géographiques les plus aisément accessibles (distance aux réseaux routiers, topographie, aptitude d'une occupation du sol, etc.).

L'intérêt de ce type d'approche repose sur la production de cartographie des futurs possibles de l'artificialisation dans le but de pouvoir évaluer, de façon quantitative, leurs impacts sur le climat urbain, le ruissellement de surface, les trames vertes, etc. La modélisation est également utilisée comme moyen de d'explicitation des déterminants de l'artificialisation. La quasi-totalité de ces études utilisent une nomenclature simplifiée de l'artificialisation, où l'urbain est considéré comme une seule classe d'utilisation du sol. Force est de constater que le caractère opérationnel de la modélisation prospective est encore à l'état embryonnaire et soulève encore un certain nombre de questions non résolues.

1.2. Mesures et tendances de l'artificialisation des sols en France

Les études portant sur l'analyse des changements d'occupation des sols vers l'urbain ou sur les autres types d'artificialisation traduisent cette tendance mondiale à l'artificialisation des territoires. Cette artificialisation s'est faite au détriment de divers types d'occupation du sol : terres agricoles ou végétalisées, forêts, espaces naturels ou inutilisés et a permis le développement des villes. Si certaines études se concentrent sur la limite de la tache urbaine, la plupart analyse de façon plus précise les changements d'occupation des sols au cours du temps pour expliquer les transitions types (1.2.1). Ces estimations très différentes (1.2.2) montrent que les tendances d'évolution de l'artificialisation sont néanmoins concordantes (1.2.3) et inscrivent la France dans la moyenne des pays Européens (1.2.4).

1.2.1. Les différentes approches de l'artificialisation des sols en France

Le tableau 1-1 récapitule les caractéristiques essentielles et les propriétés des principales sources de données qui, en France, peuvent permettre d'appréhender le niveau d'artificialisation avec une couverture nationale. Malgré leurs profondes différences d'approche, les deux premières (CLC et Teruti-Lucas) permettent de cerner la question à partir d'une analyse de la répartition de l'ensemble du territoire entre les diverses affectations des sols. Les fichiers fonciers, issus notamment du cadastre, sont plus directement centrés sur la propriété privée, bâtie ou non bâtie : ils laissent ainsi de côté les surfaces du domaine public et les infrastructures de transport. Les enquêtes de structures des exploitations agricoles se concentrent sur la contraction du territoire dédié à la production agricole et ne permettent une appréhension que très indirecte de l'artificialisation. Enfin, les données des SAFER, qui relèvent les surfaces agricoles susceptibles d'être transformées en surfaces à bâtir, s'intéressent aux pertes de surfaces agricoles, plus directement imputables au développement urbain.

Nom de l'outil	CORINE Land Cover	Teruti et Teruti-Lucas	Fichiers fonciers	Recensement MAA	Marché foncier des SAFER
Méthodologie	Interprétation visuelle d'images satellitaires, (+ données complémentaires)	Enquêtes ponctuelles extrapolées (+ données PAC depuis 2012)	Plan cadastral + infos sur propriétés bâties et non bâties. Fichiers MAJIC	Enquête sur la SAU et la structure des exploitations agricoles (ESEA)	Déclarations d'intention d'aliéner et rétrocessions des SAFER
Origine/propriété/Accessibilité des données	SOeS-CGDD Accès libre	SSP-MAA Accès libre	DGFIP/ Cerema Accès sous condition	MAA Accès ?	SAFER Accès ?
Résolution spatiale	25 ha/100 m (5 ha pour les évolutions) d'occupation homogène	Données stat. : 309 000 points (3-40 m ²) groupés en 31 500 Grappes. Pas précis à éch. < dépt	Parcelle cadastrale	Exploitation agricole	Cadastrale
Couverture nationale (en % du territoire)	100 %	100 % intégré par unités adm.) avec intervalles de confiance	100 % hors domaine public et infrastructures non cadastrées	Domaine agricole	100 %
Historique et pas de temps des données	Environ tous les 6 ans depuis 1990	Annuel depuis 1982 (coordonné avec enquête europ. Lucas depuis 1995)	Annuel	10 ans	Rapport annuel
Nomenclature	3 niveaux hiérarchiques avec 44 postes pour le plus fin	57 postes combinant occupation et usage des sols	13 postes	Agricole	Surfaces susceptibles d'urbanisation, estimées à partir de l'évolution des surfaces des marchés fonciers à destination de l'urbanisation, des maisons à la campagne et des espaces résidentiels et loisirs
Imperméabilisation	Oui, pour 2012 avec CLC HR	Oui par interprétation	Non	Non	Non
Limites	Faible résolution spatiale: vu par CLC, un tiers des communes n'ont pas de bâti	Extrapolation spatiale : non cartographiable. Biais d'enquêteur Conçu pour l'agricole : peu précis pour les classes peu représentées		Faible précision spatiale (localisation du siège de l'exploitation)	Données non validées, indiquent des tendances et non exhaustif (ne prend pas en compte les changements hors marché)
Possibilités d'évolution de la méthode	Amélioration de la résolution : « CLC HR soil sealing »	Augmentation du nombre de points			
Domaine d'application	Bonne cartographie de l'OS (100 000 ^e raster 100 m) Comparaisons européennes possibles (38 pays)	Progression de l'artif. en France à pas de temps annuel Statistiques (pas de carto) Comparaisons européennes triennales possibles (Lucas Eurostat)		Superficie agricole utilisée (SAU) par les exploitations agricoles	
Taux moyen d'augmentation des surfaces artificialisées par an	33 000 ha/an entre 2000 et 2006 16 000 ha/an entre 2006 et 2012 corrections a <i>posteriori</i>	61 200 ha /an entre 2006 et 2014	27 500 ha/an entre 2006 et 2015	Difficile à calculer	83 981 ha/an entre 2000 et 2012

Tableau 1-1. Comparaison des différents outils de mesure de l'artificialisation des sols en France

1.2.2. Des estimations très différentes du niveau de l'artificialisation des sols

Conséquence logique de la multiplicité des définitions, nomenclatures, types de données, méthodes de repérage, approches et paramétrages possibles, les résultats observés sur un même territoire varient fortement en fonction des sources de données retenues (tableau 1-2). Ainsi, l'estimation des surfaces artificialisées en France en 2014 varient de 2,35 millions d'hectares selon la source JRC retenue à 5,1 millions d'hectares selon Teruti-Lucas, *Corine Land Cover* les évaluant à 3 millions d'hectares en 2012.

Source des données	Surface totale artificialisée (à des dates différentes selon les sources)	Taux moyen d'augmentation des surfaces artificialisées par an (sur des périodes variables selon les sources)
TERUTI LUCAS (source Agreste MAAF)*	4,6 Mha en 2006 5,1 Mha en 2014	61 200 ha /an entre 2006 et 2014
Corine Land Cover (source MEEM, CGDD)**	2,5 Mha en 1990 2,7 Mha en 2000 2,9 Mha en 2006 3,0 Mha en 2012	➤ 20 000 ha/an entre 1990 et 2000 ➤ 33 000 ha/an entre 2000 et 2006 ➤ 16 000 ha/an entre 2006 et 2012
Global Human Settlement Layer (GHSL) Landsat et autres données croisées (photo et données census) (source JRC)	1,04 Mha en 1975 1,75 Mha en 1990 2,03 Mha en 2000 2,35 Mha en 2014	➤ 47 000 ha/an entre 1975 et 1990 ➤ 28 000 ha/an entre 1990 et 2000 ➤ 23 300 ha/an entre 2000 et 2014
Fichiers fonciers - MEEM – DGALN-DHUP*** - Cerema ****	- -	33 300 ha/an entre 2000 et 2010 31 800 ha/an entre 2006 et 2010 27 500 ha/an entre 2006 et 2015
Marché foncier SAFER***		83 981 ha/an entre 2000 et 2012

* Agreste, chiffres et données N° 229, mars 2015, l'utilisation du territoire en 2014

** Le point sur, l'occupation des sols en France, CGDD n°219, décembre 2015

*** Panorama de la quantification de l'évolution nationale des surfaces agricoles, mai 2014

**** La consommation d'espace et ses déterminants d'après les fichiers fonciers de la DGFIP, analyse et état des lieux au 1^{er} janvier 2015, décembre 2016 (mais pour cette méthode, le non cadastré n'est pas pris en compte).

Tableau 1-2. Diverses estimations du niveau de l'artificialisation des sols en France et de son évolution

Ces écarts très sensibles proviennent bien sûr des différences d'objectifs, de méthodes et de sources de données. Source européenne, basée sur l'interprétation d'images de télédétection, dont on a vu plus haut tout l'intérêt et le potentiel pour une analyse très précise de l'affectation des sols jusqu'à des échelles très fines, *Corine Land Cover* met, à ce jour, à disposition des données sur l'occupation des sols telle qu'elle peut être décrite sur fond de polygones de dimension assez vaste (25 ha et 100 m de large, 5 ha pour l'extension des zones). Leurs formes et positions sont quelconques car ils s'adaptent au contour de zones identifiées comme homogènes du point de vue de l'occupation des sols. Si ces données permettent une bonne appréciation de l'artificialisation des sols en zones denses et homogènes (tant du point de vue du bâti que des autres couvertures imperméabilisantes), un tel niveau de résolution peut sous-estimer ce type de couverture en zones peu denses et laisser échapper nombre de hameaux, d'habitat dispersé ou d'installations éparses, d'éléments de voiries peu larges... (Encadré 1-2). Il faut cependant noter que la nouvelle base de données CLC-HR (*Corine Land Cover* Haute Résolution) complète la base CLC avec des couches supplémentaires dont une sur l'imperméabilisation qui intègre, entre autres, des hameaux sous le seuil de 5 ha et quelques voies de communication. L'ajout des données CLC-HR et d'autres données vectorielles de réseaux permettraient de s'approcher d'une description fine de l'artificialisation.

De son côté, Teruti-Lucas, enquête statistique d'observation de l'occupation et de l'usage des sols français, souffre de biais d'échantillonnage et d'interprétation, qui pèsent d'autant plus que le phénomène à repérer concerne des surfaces faibles et dispersées. Ce qui, en revanche, fait peu de doute, c'est que les utilisations de cette source ne peuvent concerner que les échelons géographiques les plus élevés (ensemble du territoire et régions administratives), la représentativité des données s'étioyant à mesure que l'on descend vers des zones de petite dimension.

D'autres sources et méthodes existent mais sont appliquées de façon plus locale. C'est le cas en Île-de-France avec le MOS (Modes d'occupation des sols) de l'IAU-IDF. La mobilisation et l'intégration de l'ensemble des sources de données disponibles (données cadastrales, données topographiques de l'IGN, nouvelles images satellites de grande précision, etc.) pourraient permettre un véritable saut qualitatif vers une mesure plus précise du niveau d'artificialisation des sols français.

Encadré 1-2 - Exemple de différences d'estimation du MOS (Mode d'occupation du sol) et de CLC

La figure 1-2 illustre les différences d'estimation du MOS et de CLC. Le cercle rouge montre un hameau présent dans le MOS et pas dans CLC sûrement en raison du seuil (25 ha) alors qu'on voit le bâti dans la couche imperméabilisation de CLC-HR à droite. Par ailleurs la zone sous le polygone violet est classée en 'espace ouvert artificialisé' dans le MOS alors qu'il est classé en 'terre arable' dans CLC.

C'est en même temps le seuil et l'interprétation qui expliquent la différence de classification entre les deux sources de données.

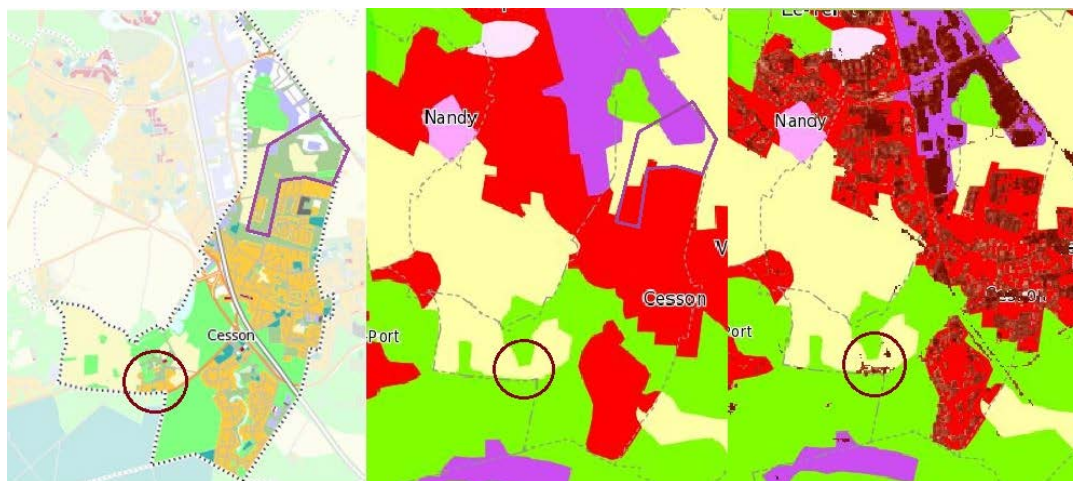


Figure 1-2. MOS- 201 (gauche), CLC 2012 (milieu) et CLC-HR 2012 (droit)

1.2.3. Des tendances d'évolution néanmoins très concordantes

En dépit de ces écarts d'estimation du niveau et donc du taux d'artificialisation des sols en France, toutes les sources convergent et mettent en évidence une tendance à l'accroissement du phénomène sur les dernières décennies.

Ainsi, les quatre millésimes *Corine Land Cover* (1990, 2000, 2006 et 2012) font état d'une croissance de 20 % des surfaces artificialisées entre 1990 et 2012, qui se décompose en une augmentation de 8 % entre 1990 et 2000, suivie d'une phase d'accélération relative de la tendance (avec une croissance de 7 % entre 2000 et 2006) et de progression un peu plus lente entre 2006 et 2012 (+ 3 % en six ans). Cette source, particulièrement bien adaptée à l'analyse des phénomènes d'urbanisation, met en lumière l'extension du tissu urbain (continu ou discontinu) qui, en 2012, couvrirait près de 2,3 millions d'hectares, soit 4,1 % du territoire national (tableau 1-3 et figure 1-3). Le rythme d'augmentation de ces tâches urbaines a été de 2 % entre 2006 et 2012, sans que l'on puisse préciser si leur composition interne, notamment la combinaison entre zones imperméabilisées et non imperméabilisées, a évolué dans un sens ou dans l'autre. Dans le même temps, les surfaces repérables dédiées aux zones industrielles, commerciales ou à des installations publiques plus dispersées (car hors tissu urbain) ont, quant à elles, augmenté, sur la même période, de 8 % et atteignent en 2012 près de 400 000 ha.

	2006			2012		
	M² ha	%	%	M² ha	%	%
Tissu urbain continu	0,044	1,5	0,1	0,044	1,5	0,1
Tissu urbain discontinu	2,208	74,8	4,0	2,253	74,3	4,1
Zones indust., commerc. & instal. publ.	0,359	12,2	0,7	0,385	12,7	0,7
Infrastructures de transport	0,103	3,5	0,2	0,109	3,6	0,2
Autres activités économiques	0,098	3,3	0,2	0,098	3,2	0,2
Espaces verts et de loisirs	0,141	4,8	0,3	0,143	4,7	0,3
Sols artificialisés	2,953	100,0	5,4	3,032	100,0	5,5
Sols agricoles	32,696		59,6	32,619		59,5
Sols forestiers et naturels	19,202		35,0	19,192		35,0
Surface totale	54,851		100,0	54,843		100,0

Tableau 1-3. Répartition des surfaces métropolitaines par nature de leur occupation selon Corine Land Cover 2006 (données corrigées) et 2012. Source : SOeS, MTES.

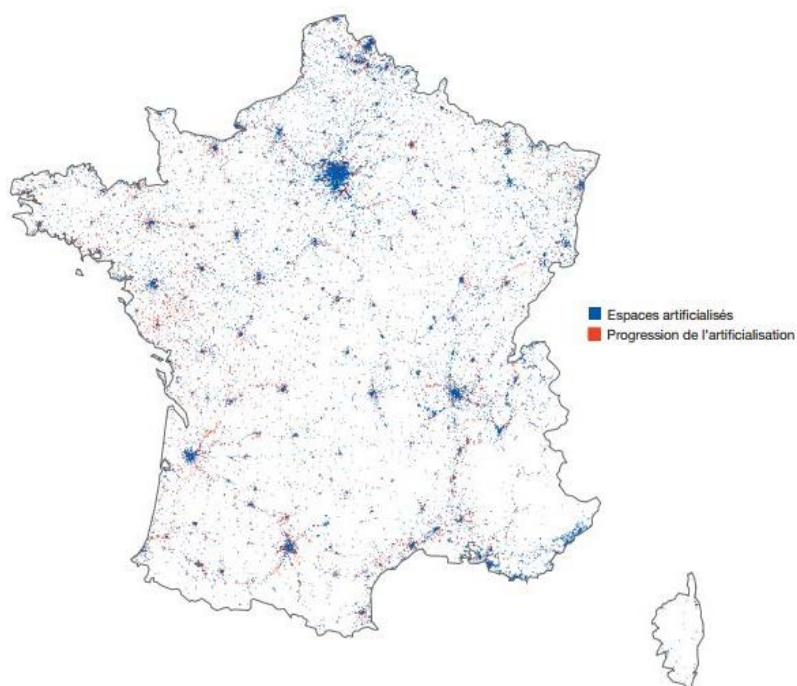


Figure 1-3. Extension de l'artificialisation entre 2006 et 2012, calculée à partir des données CLC.

Source : UE-SOeS, Corine Land Cover, 2012

Note : les polygones de changement ont été épaissis par souci de lecture

De leur côté, les données annuelles Teruti et Teruti-Lucas mettent en lumière une augmentation continue des surfaces considérées comme artificialisées sur toute la période allant de 1984 à 2014 (Figure 1-4). Après une longue période allant de 1997 à 2006 au cours de laquelle le rythme annuel d'artificialisation des sols est resté stable aux alentours de 60 000 ha/an, celui-ci subit une hausse sensible en 2007 (70 000 ha), puis un pic en 2008/2009 (> 90 000 ha/an), suivi d'une diminution des surfaces artificialisées annuelles jusqu'à un rebond en 2013 (50 000 ha) confirmé en 2014. Ce flux annuel de 50 000 à 80 000 ha/an s'oppose aux flux inverses de pertes de terres agricoles oscillant selon les années entre -40 000 ha et -100 000 ha/an, les sols « naturels » se plaçant en position intermédiaire, perdant ou gagnant des surfaces au gré des années.

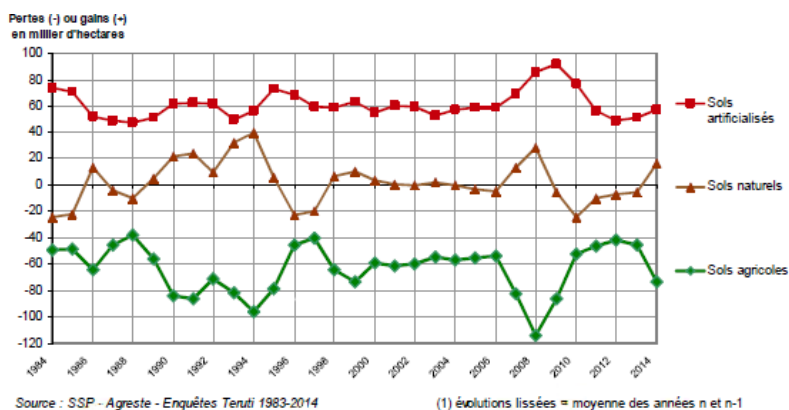


Figure 1-4. Evolution des accroissements ou diminutions annuels de surfaces selon leur occupation, selon Teruti et Teruti-Lucas

Cette source permet en outre une appréciation intéressante de la couverture des surfaces, approchant une distinction entre sols imperméabilisés et non imperméabilisés (tableau 1-4). Ainsi, en 2014, sur les 5,1 millions d'hectares considérés en France comme artificialisés, 1 million sont bâtis, 2,5 millions d'ha sont des sols revêtus ou stabilisés, linéaires ou aréolaires (infrastructures routières ou ferroviaires, voiries municipales, parkings, etc.), le reste (1,7 million d'ha) étant constitué de sols non imperméabilisés (enherbés ou nus). Sur la période récente (2006-2014), ce sont les sols bâtis qui ont le plus augmenté (+ 22 %), les sols revêtus ou stabilisés ayant subi une hausse de 14 %, alors que les sols artificialisés enherbés ou nus ne se sont accrus que de 4 %, sans que l'on sache si ces écarts de rythme de croissance sont liés au fait urbain, à l'extension urbaine, au développement du périurbain ou à de l'artificialisation en zones rurales.

	2006			2014		
	M² ha	%	%	M² ha	%	%
Sols bâtis	0,756	16,5	1,4	0,923	18,1	1,7
Sols revêtus ou stabilisés	2,159	47,3	3,9	2,456	48,1	4,5
dont de forme aréolaire	0,719	15,7	1,3	0,841	16,5	1,5
dont de forme linéaire	1,441	31,5	2,6	1,615	31,6	2,9
Autres sols artificialisés	1,653	36,2	3,0	1,725	33,8	3,1
dont enherbés	1,465	32,1	2,7	1,583	31,0	2,9
dont nus	0,188	4,1	0,3	0,142	2,8	0,3
Total Sols artificialisés	4,568	100,0	8,3	5,104	100,0	9,3
Sols agricoles	28,591		52,1	28,029		51,0
Sols boisés	17,042		31,0	17,033		31,0
Autres occupations	4,718		8,6	4,752		8,7
Surface totale	54,919		100,0	54,919		100,0

Tableau 1-4. Répartition des surfaces métropolitaines par nature de leur occupation selon les enquêtes Teruti-Lucas 2006 et 2014. Source : SSP, MAA.

Les fichiers fonciers révèlent, quant à eux, une légère augmentation du taux moyen d'urbanisation pour 2015, tendance que les chiffres SAFER confirment pour l'année 2016. Selon leurs estimations, comme au début des années 2000, les surfaces urbanisées représentent entre 50 000 et 60 000 ha par an (Rapport marchés fonciers, FNSAFER 2017).

Au final, le taux moyen d'artificialisation annuel du territoire français a donc fortement progressé dans les années 2000, jusqu'à un pic (2008/2009) ; il a ensuite diminué jusqu'en 2014, avant d'entamer une nouvelle reprise en 2015, confirmée en 2016.

Nombreuses sont les études réalisées à des échelles plus locales, qui sont en mesure de donner des résultats plus fins. Ainsi, en est-il de l'étude sur l'évolution des surfaces imperméabilisées dans l'agglomération lyonnaise réalisées par IRSTEA qui fait apparaître l'importante extension de ces surfaces entre 1975 et 2000 (figure 1-5).

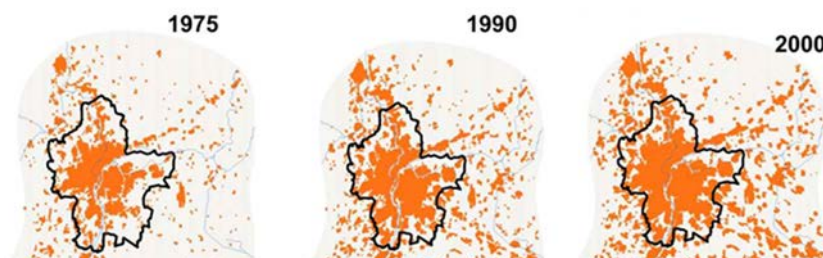


Figure 1-5. Extension entre 1975 et 2000 des surfaces imperméabilisées dans l'agglomération de Lyon (Source : IRSTEA)

De la même façon, l'étude réalisée par l'IAU-IdF sur l'artificialisation des sols en Île-de-France propose une description de l'évolution des différents types de surfaces entre 1982 et 2012, avant de focaliser l'analyse sur les flux entre catégories de 1999 et 2012 (Colsaet 2017)¹¹. Elle montre la tendance à la baisse des surfaces agricoles (- 50 000 ha en 30 ans) et l'augmentation continue des espaces artificialisés, qu'il s'agisse de surfaces bâties, revêtues ou, dans une moindre mesure, d'espaces ouverts artificialisés (tableau 1-5). Après une première phase de ralentissement de la progression des surfaces artificialisées (1999-2008), une véritable rupture se produit entre 2008 et 2012, période au cours de laquelle le ralentissement de l'artificialisation est très accentué. Le rythme de croissance des espaces bâtis ou revêtus diminue alors de moitié, et les espaces ouverts artificialisés enregistrent même une diminution, essentiellement au sein des jardins de l'habitat (une évolution de long terme qui s'accroît) mais aussi, fait nouveau, des parcs et jardins et des surfaces engazonnées, qui augmentaient jusque-là rapidement.

Tableau 1-5. Evolution nette des principaux usages du sol par période en Île de France (chiffres en ha annuels)

Sources : IAU-IdF pour les données du MOS, analyse Colsaet (2017)

Evolution en hectares annuels	1982-1999	1999-2008	2008-2012
Espaces agricoles	-1 806	-1 870	-796
dont terres labourées	-1 777	-3 416	-252
dont prairies	-60	1 490	-504
dont autres	31	56	-39
Espaces naturels	-409	660	153
dont forêts	-165	-138	83
dont espaces ouverts	-338	724	44
dont surfaces en eau	94	73	26
Espaces artificialisés	2 214	1 209	643
dont espaces ouverts	549	274	-148
dont espaces revêtus ou bâtis	1 700	1 193	707
dont carrières, décharges et chantiers	-35	-257	84

¹¹ Tableau, figure et analyse issus du rapport : Colsaet, A. 2017. *Gérer l'artificialisation des sols : une analyse du point de vue de la biodiversité*. Rapport, Institut du Développement Durable et des Relations Internationales (Idri), Paris, France, 105 p.

L'analyse des flux entre catégories entre 1999 et 2012 illustre la forte complexité des évolutions et l'importance des flux dans des directions contradictoires (figure 1-6). Ainsi, la perte des terres agricoles ne se limite pas, même en Île-de-France, à une simple artificialisation des terres agricoles. Si une surface importante de terres agricoles a bien été mobilisée pour y implanter du bâti ou être revêtue, une surface non négligeable de terres agricoles a, dans le même temps, été convertie en espaces naturels, à hauteur de 700 ha/an, les espaces boisés pesant peu dans ces mouvements (Colsaet, 2017).

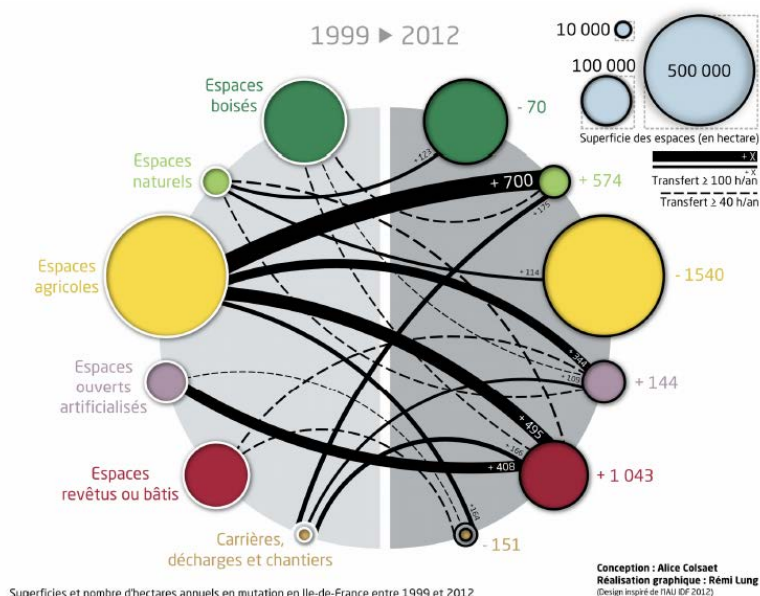


Figure 1-6. Changements d'usage des sols nets et bruts en Île-de-France, entre 1999 et 2012 (Colsaet, 2017)

1.2.4. Tendances européennes et tendances françaises

En Europe, selon *Corine Land Cover*, l'artificialisation des sols a progressé, entre 2000 et 2006, de 2,7 %, ce qui représente l'équivalent de 107 800 ha de terres supplémentaires gagnés chaque année par l'artificialisation des sols. La France est, du fait de sa vaste superficie, le deuxième plus gros contributeur en valeur absolue (13 200 ha/an), derrière l'Espagne (25 400 ha/an). En valeur relative cependant, la croissance des surfaces artificialisées se situe dans la moyenne européenne, autour de 0,5 %/an, à un rythme semblable à celui de l'Italie, environ 5 fois moins rapide qu'en Espagne et deux fois plus rapide qu'en Allemagne (dont il faut rappeler que la population diminue). La France se situe donc dans la moyenne européenne, ce qui ne veut pas dire qu'il faudrait pour autant ne pas se préoccuper de l'évolution.

En se concentrant sur la seule partie bâtie des sols imperméabilisés (Figure 1-7), la France présente une part de son territoire en surfaces bâties également proche de la moyenne européenne (5 % en 2009). Elle s'oppose aux Pays-Bas (15 %), à la Belgique (13 %) ou même à l'Allemagne (9 %) et l'Angleterre (7,5 %), dont les tissus bâtis couvrent une part nettement plus marquée de territoire. À l'inverse, les pays scandinaves, l'Irlande mais aussi l'Espagne (2,5 %) sont proportionnellement moins concernés par l'importance relative des surfaces bâties.

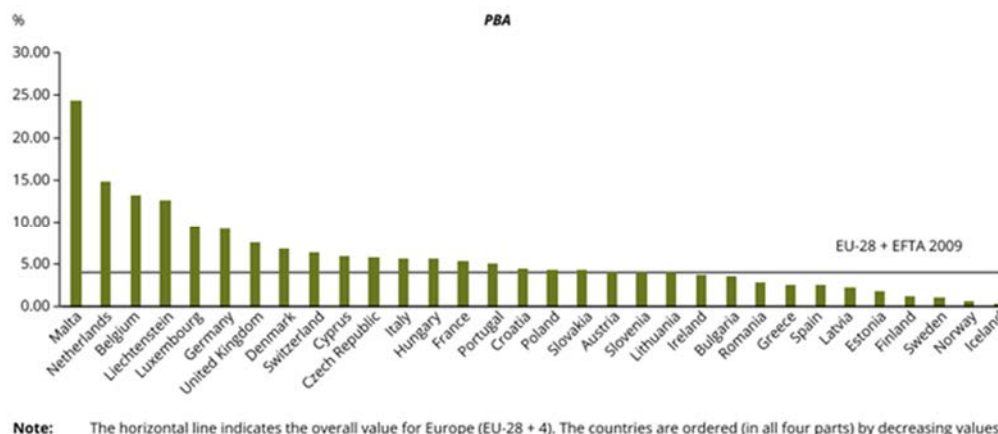
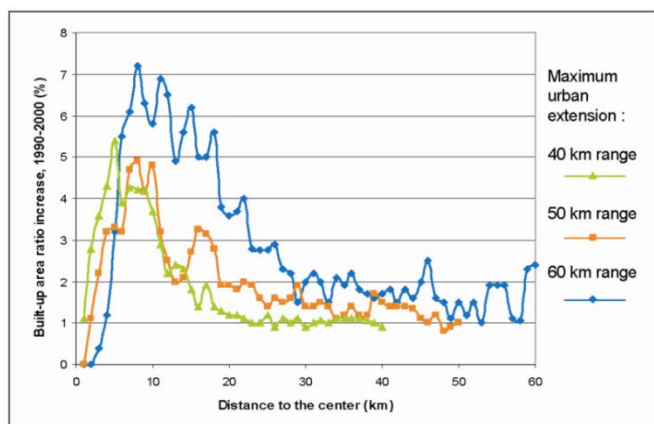


Figure 1-7. Part des surfaces bâties par pays en Europe, en 2009. Source : EEA, 2016

Comme il est souligné dans cette expertise, l'Europe subit un double mouvement de concentration des activités et des populations dans les régions urbaines et d'étalement des villes avec extension des surfaces urbaines et développement du périurbain. Dans ce mouvement, la dominante en matière d'artificialisation des sols est à l'étalement. Mais, si celui-ci se traduit par une croissance non négligeable des surfaces bâties en tout point de la périphérie, les taux d'accroissement les plus élevés des surfaces bâties s'observent aux limites immédiates des 40 agglomérations urbaines (Figure 1-8).



Ainsi, en Europe, l'étalement s'effectue bien davantage à la périphérie des zones déjà bâties et en continuité, qu'il ne colonise de plus lointaines périphéries.

Figure 1-8. Evolution 1990-2000 des surfaces urbanisées de 40 villes européennes : densification aux marges des agglomérations. Source : Guérois, Pumain, 2008

En abscisse: distance au centre de la ville (centre historique) ;

En ordonnée : accroissement relatif des surfaces urbanisées entre 1990 et 2000 par rapport à 1990, en %. La mesure est effectuée au sein d'anneaux concentriques d'un pas d'1km.

1.3. Eléments de conclusion et leviers d'action

Au-delà des débats de méthodes et des divergences importantes entre les sources, il est clair que la France, comme le reste de l'Europe, est assez fortement concernée par l'accroissement continu de ses sols artificialisés. Ce mouvement, qui tendrait à s'accélérer dans la période récente, sauf éventuellement en Île-de-France, est porté par une extension des surfaces urbanisées, comme nous le montre *Corine Land Cover*, et une expansion des surfaces imperméabilisées, plus rapide que celle des surfaces artificialisées enherbées ou nues, comme le révèle Teruti-Lucas. Néanmoins, aucune de ces deux sources majeures ne permet d'être plus précis en matière d'accroissement de l'artificialisation des sols en zones périurbaines et rurales. De la même façon, aucune de ces deux sources ne permet pas d'évaluer la façon dont se combinent entre eux les différents types de sols artificialisés pour former une mosaïque paysagère combinant sols imperméabilisés et sols enherbés ou nus. Or, certains des enjeux des impacts de l'artificialisation des sols se situent bien autour de ces deux dimensions : développement de l'artificialisation des sols au-delà des frontières de la ville ; combinaison entre surfaces imperméabilisées et non imperméabilisées au sein des territoires à sols artificialisés.

Ainsi, s'il y a lieu de progresser vers des mesures plus convergentes ou plus robustes de l'artificialisation des sols, il y a également lieu de mieux distinguer, d'une part, son rôle et sa progression dans les espaces urbains, périurbains et ruraux et, d'autre part, les différents types de couverture des sols artificialisés et la façon dont ils s'agencent entre eux. Pour ce faire, il apparaît possible d'exploiter, tant aux échelles locales que nationales, toutes les potentialités offertes par la télédétection à haute résolution, en intégrant au mieux les données vectorielles (cadastrales et topographiques) et les données de terrain (statistiques). La difficulté vient du besoin de mise à jour fréquent et du coût élevé de telles opérations. Il faut donc optimiser les processus pour maîtriser les coûts, tout en fixant un rythme de saisie approprié. L'IGN réalisant une couverture complète d'orthophotographies du territoire tous les 4 ans, cela donne idée de l'ordre de grandeur temporel qui pourrait être adopté. Le processus proposé par l'IGN pour la réalisation d'une couche d'Occupation des sols Grande Echelle de l'IGN (OSC GE) et appliqué sur l'ancienne région Midi-Pyrénées illustre bien les nouvelles possibilités de production sur tout le territoire national et souligne les besoins de coordination et de décision au niveau national encore important en la matière.

2. Les impacts de l'artificialisation sur les caractéristiques et propriétés des sols

Ce chapitre traite de l'impact de l'artificialisation sur les caractéristiques et les propriétés des « sols » au sens pédologique, en distinguant d'une part les aspects physiques, physicochimiques et chimiques (2.1), et d'autre part, les aspects biologiques et la biodiversité des organismes du sol (2.2) (la biodiversité végétale et animale à l'échelle paysagère sera abordée dans le chapitre 3). Une difficulté importante rencontrée dans cette analyse de la littérature scientifique vient de la grande diversité des situations traitées et de l'absence fréquente de caractérisation précise des modalités d'artificialisation et des types de sols analysés dans les articles. Ceci nous a obligé à regrouper les résultats en grandes catégories d'usages des sols (les SUTMA définis ci-dessous) en essayant toutefois de distinguer, lorsque cela était possible, le degré de perturbation et/ou de contamination et le niveau de végétalisation présent (jardins, espaces verts...) ou envisagé dans le cas des sols réhabilités. Cette catégorisation est largement insuffisante pour répondre à l'ensemble des questions posées car elle conduit à mélanger des situations très différentes. Nous proposons cependant dans ce chapitre une ébauche de classification combinant usage et caractérisation pédologique qui reste à consolider (Tableau 2.1), cette question étant effectivement identifiée comme un besoin de recherche prioritaire.

2.1. Impacts de l'artificialisation sur les caractéristiques physiques, physicochimiques et chimiques des sols

La caractérisation physique et chimique des sols artificialisés est un domaine de recherche très récent. La prise de conscience des risques sanitaires et environnementaux associés aux sols artificialisés a d'abord conduit à étudier les sites miniers et industriels dans les années 1990, avec une problématique de contamination des sols (pollutions métalliques et organiques), avant d'aborder plus récemment les sols urbains (Figure 2-1). Parallèlement, le développement de l'hydrologie urbaine amène à reconsidérer le rôle des sols en milieu urbain, essentiel dans la gestion des flux d'eau et de matières (matières en suspension et polluants) (cf. Chapitre 3). Les diverses fonctions des sols en milieu artificialisé sont identifiées et doivent donc être garanties : régulation du cycle de l'eau, dégradation et rétention des polluants, stockage de carbone, production de biomasse végétale, support de biodiversité au sein des trames vertes.

La caractérisation physico-chimique des sols artificialisés croise des approches provenant de disciplines telles que la pédologie, la géotechnique et la géochimie. Les sols artificialisés ont été principalement décrits et classés en fonction de leurs usages. Ils sont regroupés, depuis 1998, au niveau international sous l'acronyme SUTMA (*soils in urban, industrial, traffic, mining, and military areas*). Les propriétés physico-chimiques de ces sols, présentant différents degrés d'artificialisation, sont étudiées depuis un peu plus de 20 ans. Les connaissances sont donc encore récentes, peu consolidées et non généralisées.

Encadré 2-1 - Le corpus bibliographique et son analyse

Le corpus analysé comporte 273 références. La très grande majorité des articles traite de l'analyse des propriétés de sols mesurées sur un site réel avec une approche essentiellement destinée à établir un "diagnostic" (zone urbaine plus ou moins grande, gradient d'urbanisation, site minier...) Ce corpus a fait l'objet d'un dépouillement par type de SUTMA.

Parmi ces références seulement 59 rapportent spécifiquement des caractéristiques pédologiques (caractéristiques physiques et chimiques globales) des sols artificialisés. Ces 59 études sont en majorité très récentes (Figure 2-1) ; près d'un tiers a été produit en Europe (3 seulement en France), les autres étant majoritairement issues des Etats-Unis et d'Asie du Sud-est.

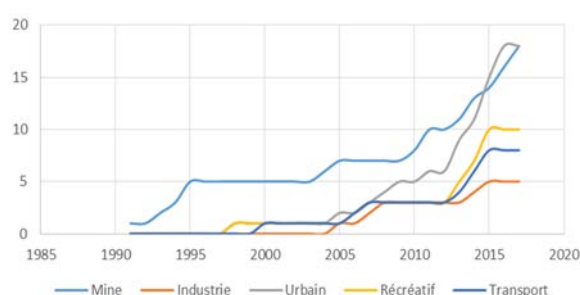


Figure 2-1. Années de publication des 59 études rapportant spécifiquement des caractéristiques pédologiques et physico-chimiques des différents SUTMA (nombres cumulés depuis 1990)

2.1.1. Spécificités et classification des sols artificialisés

• Spécificités des sols artificialisés

Les sols des zones artificialisées sont de deux natures différentes : des sols en place, dits « naturels », mais qui subissent les conséquences de l'artificialisation (ex : apports de métaux lourds à partir de dépôts atmosphériques ou de ruissellement de surface) et des sols qui ont été modifiés. Pour ces derniers, le facteur pédogénétique prédominant est l'Homme qui vient se surimposer aux autres facteurs déterminants de la pédogenèse naturelle des sols (roche mère, climat...). L'Homme : 1) transforme par mélange, compactage ou aération des couches de matériaux, 2) excave et exporte les matériaux des sols conduisant à leur troncature partielle ou totale, 3) apporte des matériaux exogènes terreux ou technogéniques (minéraux, gravats, déchets industriels ou ménagers...), qui imposent une cinétique de transformation et d'évolution des matériaux très rapide, et enfin 4) scelle les surfaces par des revêtements ou des constructions souvent presque totalement imperméables.

Les sols artificialisés anciens et contemporains présentent des caractéristiques très contrastées en fonction de l'âge du site, de ses usages successifs, de l'intensité des apports de matériaux technogéniques et des procédés de "génie pédologique" parfois mis en œuvre pour donner au sol de nouvelles fonctions ou pour restaurer des fonctions perdues. Ces sols artificialisés recouvrent donc une large gamme de réalités pédologiques, allant de sols naturels localisés dans des zones artificialisées (certains parcs, jardins ouvriers, agriculture péri-urbaine...), à des sols plus ou moins tronqués et/ou enrichis en matériaux technogéniques, jusqu'à des sols construits à partir de matériaux terreux et/ou technogéniques lors de travaux d'aménagement ou de réhabilitation de sols.

• Typologie des sols artificialisés dans les classifications

La classification des sols artificialisés porte sur ceux pour lesquels le facteur pédologique principal est l'homme, et ne concerne pas ceux dont le profil naturel est conservé et qui sont décrits par des classifications déjà existantes. Pour ces sols artificialisés, l'enjeu est de disposer d'un système de référence s'appuyant sur des descriptions morphologiques et sur la définition de leurs caractéristiques spécifiques permettant des comparaisons et des classifications. La pédologie classique est fondée sur une approche morphogénétique des sols : elle procède par analyse de son profil, structuré en horizons qui reflètent les processus de la pédogenèse et conditionnent ses propriétés. Les références pédologiques sont établies majoritairement sur les sols forestiers (peu perturbés) ou agricoles. Certains référentiels pédologiques ont récemment intégré les sols artificialisés dans leurs typologies.

Dans le Référentiel pédologique français (RPF, 2008), les sols artificialisés sont dénommés Anthrosols. Ce sont soit des sols d'origine naturelle tellement transformés par des processus anthropogéniques qu'ils ne peuvent plus être rattachés au sol originel ou à d'autres références naturelles (Anthrosols transformés), soit des sols fabriqués par l'Homme (intentionnellement, via une opération de "génie pédologique" visant généralement une végétalisation), par des apports de matériaux terreux (Anthrosols reconstitués) ou de déchets non pédologiques (Anthrosols construits), soit encore des sols constitués entièrement de matériaux non pédologiques (Anthrosols artificiels).

Au niveau international, la *World Reference Base for Soil Resources* (WRBSR) propose une terminologie équivalente, qui distingue des Anthrosols, correspondant à peu près aux Anthrosols transformés, et des Technosols, qui regroupent en première approximation les Anthrosols artificiels et reconstitués.

Cependant ces classifications restent basées sur la morphologie du sol liée aux interventions humaines. Il paraissait indispensable d'intégrer l'usage du sol dans ces classifications afin de mieux quantifier les potentiels et les services à attendre de chaque sol (Morel et al., 2014) d'où la définition des SUITMAs (Tableau 2.1).

S'il semble évident que les deux grandes catégories de sols, à profil naturel versus Anthrosol, ont des propriétés très différentes, les éléments disponibles dans la littérature ne permettent pas toujours de rattacher les sols étudiés à ces deux grandes catégories. En outre, il serait souhaitable pouvoir distinguer les différents types de sols urbains, notamment de différencier ceux de jardins (privés ou collectifs), parcs et forêts urbains, abords de bâtiments ou de voies de circulation, sols revêtus et bâtis. En effet, les caractéristiques des sols dépendent beaucoup des pratiques, les sols de jardin, par exemple, étant globalement très fertiles, riches en matière organique, et contaminés en certains polluants spécifiques (pesticides) alors que les sols en abords de bâtiments sont beaucoup moins fertiles et généralement compactés. De même les impacts des pollutions seront radicalement différents avec des risques de contamination des aliments dans les jardins et une absence de risque de contamination de l'eau superficielle ou de contamination des aliments pour les sols bâtis ou revêtus, etc. Néanmoins, cette distinction n'a pas été possible au vu de la littérature disponible dans laquelle les sols sont en grande majorité qualifiés « d'urbains », ou « en zone résidentielle », sans de plus ample information.

Type de sol RPF SUITMA	Sols naturels non transformés	Anthroposols transformés	Anthroposols reconstitués ou construits	Anthroposols artificiels ouverts	Anthroposols artificiels scellés/imperméabilisés
Zone urbaine	jardins, enclaves agricoles résiduelles	jardins, agriculture urbaine	jardins créés, végétalisation de zones bâties	Friches urbaines	surfaces bâties, voirie, trottoirs, places, parkings
Zone industrielle	enclaves naturelles		abords végétalisés des installations industrielles	Friches industrielles, centre d'enfouissement de déchets	Bâtiments et infrastructures industriels et logistiques
Infrastructure de transport			abords végétalisés des voies	voies ferroviaires, remblais bruts, chemins non revêtus	Voirie, aéroports, installations portuaires
Zone minière/ carrières	enclaves naturelles	Zones affectées par des retombées d'activités minières ou carrières	Terrils et carrières réhabilités	terrils et carrières abandonnés	Zone de tri, de stockage, pistes
Zone militaire		Terrains de manœuvre militaires			Infrastructures militaires

Tableau 2-1. Catégories de SUITMA et types de sols définis par le Référentiel Pédologique Français (RPF, 2008)

A titre d'illustration, cette figure (Figure 2-2) montre la variabilité des horizons des sols artificialisés selon la catégorie dans laquelle ils se situent.

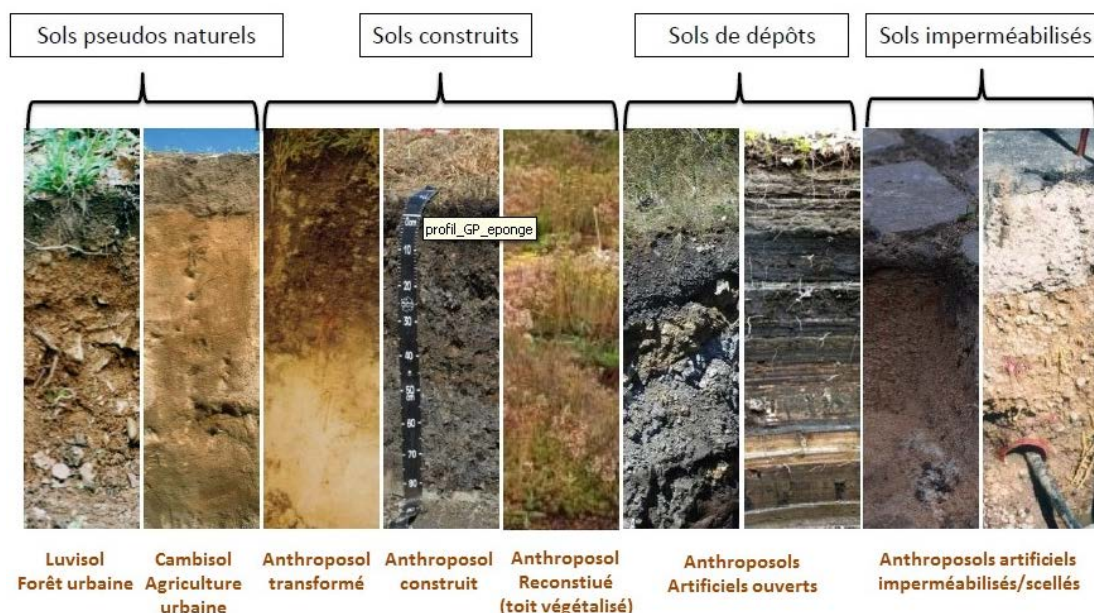


Figure 2-2 : Une influence urbaine croissante (crédits photos : C. Schwartz)

2.1.2. Caractéristiques et propriétés des sols artificialisés

Bien que ces sols soient modifiés profondément par l'Homme et souvent dominés par la présence de matériaux artificiels, ce sont actuellement les mêmes caractéristiques physiques et physico-chimiques que pour les sols naturels qui sont considérées et qui déterminent les propriétés des sols artificialisés.

L'analyse et l'interprétation des modifications des caractéristiques des sols, liées à l'artificialisation, doivent être associées à une situation "de référence" qui est très délicate à définir. Dans les publications examinées, les sols de "référence" sont soit agricoles (dans 20 à 30% des cas) soit forestiers proches de la zone étudiée. Mais l'occupation des sols de référence n'est pas précisée dans plus de la moitié des cas et il n'y a souvent aucun sol de référence. Comparer avec un sol agricole adjacent peut se justifier dans la mesure où les sols artificialisés sont en majorité utilisés à l'origine pour la production agricole. Cependant, sans critères de référence précis il reste difficile de tirer des conclusions sur la qualité des sols artificialisés et son évaluation positive ou négative au cours du temps.

- Des caractéristiques physiques et morphologiques influençant le transfert de l'eau et le développement des végétaux

La capacité d'infiltration des sols figure parmi les principales propriétés affectées par l'artificialisation. Elle est associée à des enjeux très importants : le ruissellement et donc les risques d'inondation et d'érosion hydrique (cf 3.2). On estime que 60 à 70% des sols artificialisés sont imperméabilisés, et ceux qui ne le sont pas sont susceptibles d'être compactés par les activités d'aménagement.

Plus globalement, au-delà de ces propriétés de surface, la structure des sols artificialisés est très souvent perturbée et marquée par une forte pierrosité due à l'apport de matériaux allochtones/exogènes (matériaux de démolition, déchets de décharge, résidus de mines). En fonction de leur mode de dépôt, ces matériaux peuvent constituer des barrières impénétrables pour le développement des racines. De plus, ils présentent souvent une faible capacité de rétention en eau et une faible réserve en éléments nutritifs qui limitent la croissance des végétaux.

La compaction des sols artificialisés est un corollaire de l'usage de ces sols (construction d'infrastructures, de bâtiments) et, pour les sols ouverts, dépend du type de couvert végétal. Les piétinements, la création récente d'une zone résidentielle sont des facteurs d'augmentation de la masse volumique apparente des matériaux, avec une forte diminution de la capacité d'infiltration.

L'artificialisation conduit le plus souvent à un remaniement ou un décapage des horizons de surface et à une destruction de la couverture végétale, qui fragilisent la structure des sols et les exposent directement à l'action de la pluie et du ruissellement. Il en résulte une augmentation, au moins temporaire, du risque d'érosion hydrique, avant qu'un nouvel équilibre ne s'installe. Les espaces végétalisés présentent ainsi une période de forte vulnérabilité après leur aménagement, avant que les sols ne se stabilisent et que la végétation s'établisse et les protège. Il a été montré en milieu méditerranéen que l'érosion peut sérieusement compromettre la dynamique de revégétalisation de sols en cours de réhabilitation. La construction d'Anthrosols imperméabilisés conduit de son côté à un accroissement local du ruissellement, qui peut induire une érosion accélérée des sols environnants. Sur sols miniers, l'érosion hydrique peut être à l'origine de graves pollutions (métaux lourds, drainage miniers acides...).

- Une forte hétérogénéité spatiale qui rend difficiles les comparaisons entre sols

En contexte non artificialisé, la couverture pédologique est naturellement hétérogène horizontalement et verticalement. L'artificialisation d'un même sol, pour divers usages et sous diverses formes au cours du temps ajoute à cette hétérogénéité. La détermination des caractéristiques des sols artificialisés est ainsi complexifiée par cette grande hétérogénéité spatiale. Les caractéristiques peuvent varier fortement en quelques mètres pour un même usage de sol, et les processus d'altération y sont intenses et rapides. De plus, les comparaisons sont rendues difficiles par la diversité des méthodes de prélèvement et des techniques analytiques utilisées pour mesurer les propriétés physiques et les teneurs en éléments chimiques.

Les variables physico-chimiques les plus souvent mesurées dans les sols artificialisés sont la masse volumique apparente, la conductivité hydraulique, la teneur en matière organique, la capacité d'échange cationique (CEC) et la conductivité électrique (EC), qui sont en général peu différentes en surface de celles des sols de référence, ainsi que le pH, qui est lui souvent supérieur à 7 du fait notamment de la présence de matériaux technogéniques carbonatés (bétons, ciments...), fréquents dans les sols urbains et les infrastructures. Il existe également des sols artificialisés acides, notamment des sols miniers métallifères et industriels, qui peuvent même présenter des pH très acides (< 4) dans plus de 40% des cas.

- Une dynamique du carbone organique hétérogène

Le stock de carbone organique (C) a un effet direct sur les fonctions du sol telles que la capacité de rétention en eau, la réserve d'éléments nutritifs, les cycles de l'azote et du carbone, le développement des végétaux, et un effet indirect sur les fonctions de régulation des flux hydriques et du climat.

Plusieurs études françaises ont montré que les sols artificialisés ouverts présentaient des concentrations en carbone en moyenne supérieures à celles observées dans les autres sols, mais avec une grande variabilité. Au sein des zones urbaines, les sols des jardins potagers collectifs se distinguent par leurs teneurs élevées en carbone organique et en substances nutritives (cf. Encadré 2-3). D'autres sols urbains présentent une forte diminution des stocks de C, du fait du changement d'usage et de la suppression du couvert végétal. Ainsi, l'imperméabilisation d'un sol peut diminuer le stock de C car elle se traduit par un décapage de la couche de surface en général plus organique et par l'absence d'introduction de matière organique fraîche. A l'inverse, elle peut protéger des couches organiques profondes constituées lors d'usages antérieurs ayant abouti à la formation du sol.

Les stocks potentiels de C du sol dépendent du type de couvert végétal et de son âge. Ils seront plus élevés dans une forêt urbaine mixte que dans une forêt composée uniquement de feuillus ou de résineux. Les horizons de surface des sols sous pelouse urbaine (10-30 cm de profondeur) peuvent séquestrer jusqu'à deux fois plus de carbone que les sols forestiers ; ce fait serait lié à la plus forte biomasse racinaire des graminées dans les 30 premiers cm de sol, et à une gestion intensive des

espaces enherbés (tonte, arrosage, fertilisation) qui augmente la production racinaire. Le cycle du C dans les sols urbains est aussi affecté par la compaction, qui limite le développement racinaire des arbres et donc leur stockage de C. La macrofaune (en particulier les vers de terre), quant à elle, accélère la décomposition de la MO et son mélange et augmente la teneur en C du premier horizon de sol. Pour l'instant les travaux portent principalement sur des calculs de stocks instantanés, éventuellement de façon diachronique, des travaux plus récents commencent à aborder un aspect dynamique en l'associant à une modélisation de la dynamique du carbone.

• Une pollution importante par les éléments traces métalliques et métalloïdes (ETM)

Les ETM sont les polluants qui ont été le plus mesurés et étudiés dans les sols industriels, urbains et miniers. Les métaux suivis sont généralement le zinc, le cuivre, le cadmium, le plomb, le nickel, et le chrome. Certaines études mènent une observation sur plusieurs métaux d'autres se concentrent uniquement sur certains d'entre eux en fonction du contexte de l'étude. Les niveaux de concentration mesurés en zones urbaines montrent un enrichissement, principalement de la couche de surface des sols (jusqu'à 20 cm de profondeur), en ETM par rapport à des zones "témoins" (zones agricoles, parcs éloignés de la ville, sols de forêt, ou valeurs de fonds géochimiques publiées dans la littérature). Des indices permettant de classer les sols par niveau de pollution ont été développés (facteur d'enrichissement par élément, index de charge polluante globale). Les approches sont multiples : elles prennent pour référence des valeurs extraites de la littérature, des valeurs mesurées nationales ou plus locales, ou des seuils réglementaires existant dans le pays ou définis à l'échelle européenne ou internationale. Il existe globalement un lien entre la densité de l'urbanisation, l'ancienneté de l'artificialisation du sol et la concentration en métaux dans les sols. Deux situations sont toutefois distinguées :

– Un contexte de **pollution diffuse**, où des sols peu remaniés et contenant peu de matériaux technogéniques subissent un enrichissement de surface en métaux, dû essentiellement à des apports atmosphériques issus des activités industrielles et urbaines, avec notamment des surconcentrations en ETM liées à des retombées de microparticules et nanoparticules atmosphériques (transport aérien de poussières, trafic automobile, chauffage), au lessivage des matériaux (matériaux constituant les toitures, voire les murs) et des voiries (usure des pièces automobiles, sels de déneigement par ex.). Dans ce cas, on parlera d'une signature urbaine globale. Les surconcentrations ne dépassent en général pas les seuils associés à des risques toxiques avérés ou potentiels nécessitant d'interdire certains usages des sols, ce qui ne doit pas exclure les vérifications au cas par cas.

– Un contexte de **pollution concentrée**, dans des sols très anthropisés qui contiennent des matériaux (sédiments, déchets, résidus de produits industriels) riches en certains ETM, ou aux abords de sites industriels dégageant des émissions atmosphériques polluantes. L'identification des sources des métaux est alors beaucoup plus précise, mais les contaminations sont très spécifiques des matériaux mélangés dans les sols. L'interprétation des teneurs en métaux des sols miniers et industriels reste toutefois souvent complexe, en raison d'évolutions des activités qui ont généré des déchets et déblais variés, et du manque d'information sur les conditions de mise en place des sols. Les concentrations en ETM peuvent être 10 à 50 fois supérieures à celles mesurées dans les zones urbaines en moyenne, et ces terres, qu'elles soient en surface ou enfouies historiquement en profondeur, présentent des risques de contamination réels pour le sous-sol et des risques toxiques pour l'Homme et son environnement.

A noter que la pollution des sols urbains est en grande partie historique : des sources de pollutions, aujourd'hui disparues, ont contaminé les sols (ex. le plomb de l'essence, arrêt d'activités industrielles polluantes...).

Un "gradient" entre la zone centre plus contaminée et les zones périurbaines est mis en évidence depuis quelques années, mais une relation plus fine entre l'occupation du sol et la concentration en ETM dans les sols le long du gradient n'est pas évidente à faire apparaître : la variabilité de la mesure et le faible nombre d'échantillons ne permet généralement pas d'établir des tendances statistiquement valides.

Les sols urbanisés sont donc des interfaces de stockage des métaux traces. Les observations montrent que la solubilité des métaux et leur mobilité potentielle sont globalement faibles. Présentant des caractéristiques propices à la rétention des cations métalliques (sols carbonatés, enrichis en MO, végétalisés), les sols urbains jouent le rôle de puits pour ces ETM qu'ils sont capables d'accumuler en surface ou dans certains horizons depuis plusieurs siècles. Une étude réalisée en Ile-de-France confirme et quantifie ce stockage d'ETM, et notamment de cadmium (Encadré 2-2). Dans le cas des métalloïdes, très peu abordés dans la littérature en ce qui concerne les sols artificialisés, les pH alcalins des milieux urbanisés seraient plutôt favorables à leur mobilité. La mobilité potentielle de ces contaminants est donc essentielle à considérer lorsqu'on envisage la gestion à long terme de ces surfaces et la réversibilité des usages des zones urbaines.

Encadré 2-2. Les teneurs en ETM le long d'un gradient de pression urbaine en région parisienne

Une étude très récente (2017) a mesuré les contaminations en ETM de 180 sols de pelouse ou de bois répartis en Ile-de-France. Cuivre (Cu), cadmium (Cd), plomb (Pb) et zinc (Zn) s'avèrent d'origine anthropique, alors qu'arsenic (As), chrome (Cr) et nickel (Ni) sont d'origine naturelle. Le trafic routier a été identifié comme la première source anthropique d'ETM, et l'activité industrielle, notamment la cimenterie, comme la deuxième source pour le Cd. Des caractéristiques telles que la texture, les teneurs en carbone organique et en azote total reflètent les origines et héritages des sols, qui peuvent souvent expliquer leurs teneurs en ETM. Les sols urbains boisés apparaissent plus contaminés que ceux des pelouses, probablement parce que les bois sont beaucoup plus anciens (ils datent de l'époque haussmannienne). La capacité des couverts forestiers à augmenter les flux en certains ETM du fait de leur feuillage ne peut être exclue. Les sols urbains de pelouse sont similaires aux sols agricoles fertiles ; importés des environs de Paris surtout à partir des années 1950, ils sont depuis moins longtemps exposés aux conditions urbaines d'apports d'ETM.

Les concentrations en ETM anthropiques augmentent des zones rurales aux zones urbaines (Figure 2-3), où elles atteignent ou dépassent souvent les seuils réglementaires. Les fortes pollutions au Cd des sols urbains boisés constituent un risque élevé pour les communautés biologiques.

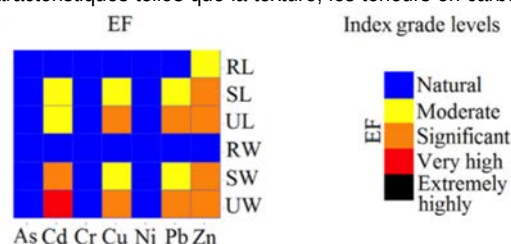


Figure 2-3. Enrichissement en ETM des sols en Ile-de-France (source : Foti et al., 2017)

EF : facteur d'enrichissement, par rapport au fond géochimique local, supposé exempt de contaminations anthropiques
R : rural, S : périurbain, U : urbain, L : pelouse, W : bois

Encadré 2-3. Le cas particulier des sols de jardins urbains

Si de nombreux travaux ont mis en avant la contamination potentielle des sols de jardins potagers urbains, il faut aussi souligner leur fertilité, résultant de pratiques culturales très intensives et variées. Par rapport aux sols agricoles, les sols de jardins présentent ainsi des taux de matière organique plus forts (>4 % en moyenne, contre 1-3 %) et, dans 70 % des cas, des teneurs en éléments nutritifs très élevées. Mais, ils ont aussi des teneurs en métaux totaux qui sont, en moyenne, deux fois supérieures ; elles sont liées à l'utilisation répétée d'engrais et de pesticides (source majeure de pollution), aux déchets solides hérités d'anciennes activités minières ou industrielles, et aux émissions industrielles, urbaines ou du trafic automobile. À long terme, des métaux ou des polluants organiques peuvent s'accumuler dans ces sols, et atteindre des concentrations toxiques pour les humains et les écosystèmes.

La qualité des sols de jardins est globalement très variable. Une étude récente portant sur 4 villes européennes a montré, à l'échelle de la ville et du jardin, que la variabilité observée pour les principales propriétés est dominée par la géologie locale (le matériau parental), et par les pratiques de jardinage, qui diffèrent d'un pays à l'autre. La gamme des concentrations en ETM est similaire pour 3 des 4 villes. Des valeurs extrêmes sont observées pour Cu, Pb et Zn qui s'expliquent principalement par les situations historiques et environnementales des sites montrant l'influence de l'histoire et des successions d'usages des sols, et des apports liés à des facteurs externes (activités industrielles, trafic routier...).

• Des contaminations par les polluants organiques encore mal connues

Depuis plus de 20 ans, les études sont focalisées sur les sols urbanisés ou industriels, et les mesures concernent essentiellement les concentrations en hydrocarbures totaux et hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) ainsi que leur devenir. Une littérature très abondante existe sur les caractéristiques des HAP dans les sols des friches industrielles, il y a beaucoup moins d'études sur les sols urbains. Ces mesures sont souvent couplées à celle des ETM sur les mêmes sites dans une démarche d'évaluation globale de la qualité physico-chimique des sols. La recherche spécifique des hydrocarbures est liée à leur origine industrielle (sidérurgie et héritage dans de nombreux sites industriels en France et en Europe) ou au trafic automobile. En ce qui concerne les HAP, on peut souligner que les principaux résultats à retenir sont les mêmes que pour les métaux lourds. Les sols artificialisés sont des zones de stockage des HAP qui persistent maintenant depuis presque 100 ans sur certains sites industriels, ils sont très peu mobiles du fait de leur faible solubilité et de la même façon suivant les types d'apport (atmosphérique ou apport direct par des déchets riches en HAP), les sols sont enrichis uniquement en surface ou très contaminés dans les horizons contenant des déchets.

Très récemment, des recherches ont été engagées sur certains polluants organiques émergents, avec des difficultés liées aux méthodes analytiques (retardateurs de flamme (polybromodiphényléthers : PBDE), pesticides organochlorés, résidus médicamenteux...) du fait de la présence de ces molécules en ultra trace et des stratégies de prélèvement non adaptées à ces molécules dans ces milieux très hétérogènes. L'étude de ces polluants dans les sols est complexe car il faut mesurer les concentrations de plusieurs congénères, mais également les métabolites produits lors de la dégradation de ces molécules dans les sols qui sont parfois plus mobiles et plus toxiques. Les temps de persistance ainsi que la volatilité sont également des informations à avoir. En ce qui concerne les niveaux de référence, nous n'avons trouvé qu'une seule publication qui mesure les concentrations de PBDE dans des sols forestiers ou prairiaux au Royaume Uni et en Norvège avec des

concentrations moyennes de 600 à 2500 ng/kg. Les quelques autres références dédiées aux polluants émergents dans les sols urbains sont plutôt consacrées à évaluer la mobilité/volatilité de ces molécules et leur temps de 1/2 vie dans des conditions contrôlées et montrent la mobilité potentielle de ces molécules et de leurs métabolites dans le sous-sol.

• Vers des indicateurs synthétiques de la qualité des sols pour une meilleure gestion

Les indicateurs de qualité des sols sont utilisés depuis longtemps pour les sols agricoles afin d'évaluer leur fertilité. Les sols artificialisés ont été proportionnellement peu évalués selon de telles grilles. L'utilisation d'indices dans le cas des sols artificialisés a deux objectifs : d'une part évaluer effectivement leur fertilité en particulier par rapport aux sols agricoles (puisque les sols artificialisés sont majoritairement d'anciens sols agricoles), et d'autre part essayer d'établir un lien entre intensité d'artificialisation et la qualité du sol via des corrélations. Une des applications attendues est la prise en compte de ces indices de qualité dans les projets d'aménagement ou, de façon encore plus efficace, dans les plans d'urbanisme, afin de pouvoir préserver lors de la planification les sols présentant les meilleures potentialités en termes de services écosystémiques. La production d'indicateurs peut aussi avoir comme finalité plus générale d'alerter sur la dégradation de la qualité des sols associée à l'urbanisation croissante.

Dans la littérature, les caractéristiques des sols sont présentées en fonction de leur occupation, afin de mettre en évidence une potentielle relation positive entre l'accroissement du degré d'artificialisation et l'augmentation des concentrations en polluants et/ou l'altération des paramètres de fertilité des sols. Les indices de qualité peuvent être de niveaux différents : paramètre ou agrégation de paramètres avec tout le questionnement associé sur la pondération à retenir. Les études présentant à la fois des indicateurs et leur utilisation à des fins d'optimisation de l'usage des sols sont rares. Cependant les indices à visée intégratrice se sont beaucoup développés. Ils intègrent toutefois peu les caractéristiques pédologiques. Ils sont majoritairement utilisés pour décrire des pertes de fonctionnalités des sols.

A titre d'exemple, l'indice NAC (*Natural pollutant attenuation capacity of urban soils*) combine les paramètres % C organique, % argile, densité apparente, pH et azote total. Si les classes de l'indice sont définies judicieusement, il est possible de mettre en évidence des tendances entre la valeur du NAC et le type d'occupation du sol (Figure 2-4). Le NAC est également corrélé à l'âge de l'artificialisation (concept de *resilience-recovery* des sols).

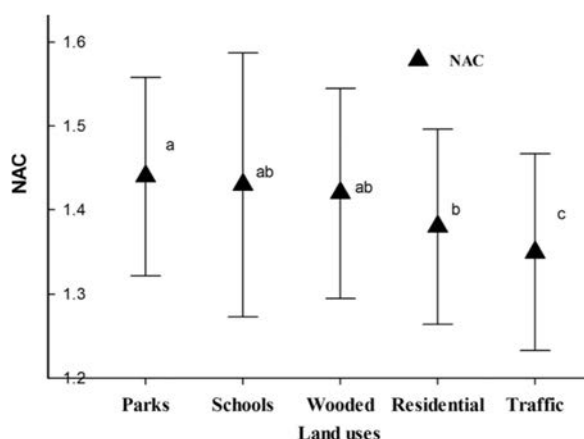


Figure 2-4. Capacité d'atténuation naturelle des polluants de sols urbains en fonction de l'occupation du sol, dans la ville de Beijing (Source : Wang et al., 2015).
Indice sans dimension ; des valeurs plus élevées indiquent une plus grande capacité. Valeurs représentées : moyenne ± écart-type.

Des réflexions sont menées en France sur les possibilités d'intégration de la notion de qualité des sols dans les projets d'aménagement du territoire. Un exemple est fourni par le projet Uqualisol-ZU (programme GESSOL), dans lequel il a été considéré d'une part le sol et ses caractéristiques physico-chimiques, microbiologiques et physiques et d'autre part les occupations et usages des sols. Un indice orienté « usage des sols », basé sur les fonctions remplies par le sol pour chacun des usages identifiés dans l'espace géographique, a ainsi été conçu (Keller et al. 2012). Cet indice de polyvalence d'usage présente l'avantage d'être relativement facile à appréhender pour les décideurs (Figure 2-5). Cette qualification des sols via des indices synthétiques suscite un intérêt croissant. Mais il n'existe pas encore de consensus concernant les paramètres les plus pertinents et incontournables pour décrire les caractéristiques et potentialités de ces sols. La réglementation en matière de contamination (calculs d'exposition et de risque sanitaire pour la population) semble cependant jouer un rôle moteur dans la caractérisation de ces sols.

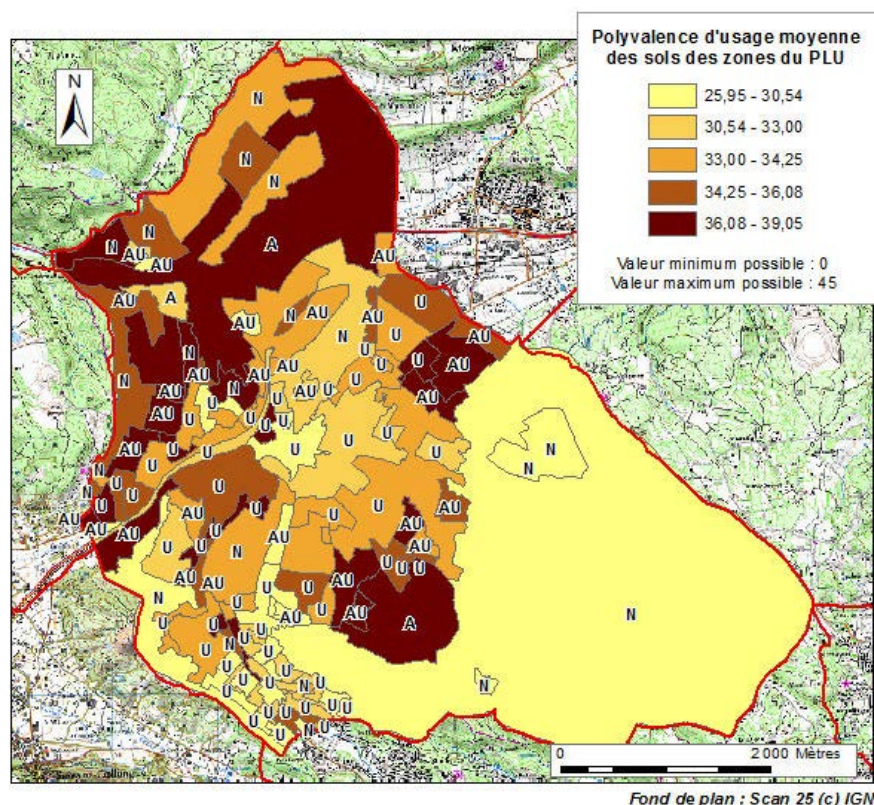


Figure 2-5 : Carte de polyvalence d'usage des sols par zones du PLU de Gardanne. Les lettres reportées sur les surfaces correspondent au zonage du PLU : U : urbain, A : agricole, N : naturel, AU : à urbaniser.

2.1.3. Synthèse sur les caractéristiques physico-chimiques des sols artificialisés

En résumé, les SUTMA sont caractérisés par :

- une extrême variabilité spatiale liée à la complexité de leur historique, de l'échelle millimétrique à l'échelle métrique, pour les sols urbains formés à partir de matériaux remaniés et déplacés, mais aussi affectés par les apports atmosphériques
- une forte pierrosité, notamment en profondeur pour les sols miniers, liée à la mise en place des infrastructures de transport, ce qui induit des taux de compaction fréquemment élevés ;
- la nature des matériaux technogéniques qu'ils contiennent, leur abondance et leur taille ;
- une forte diminution de la capacité d'infiltration et de rétention en eau en lien avec l'imperméabilisation et la compaction, à l'exclusion des sols végétalisés (espace vert, parc et jardins et zone d'agriculture urbaine) et des dispositifs dédiés à l'infiltration des eaux pluviales ;
- des pH souvent supérieurs à 7 pour les sols urbains et ceux des infrastructures de transport, ou au contraire acides à très acides pour les sols miniers et industriels ;
- des teneurs en matières organiques très variables en fonction de l'usage du sol (fortes dans les sols ouverts tels que les jardins potagers, les pelouses et faibles dans les zones imperméabilisées urbaines et minières) et de sa genèse mais avec des teneurs dans la couche de surface en moyenne supérieure aux sols non artificialisés ;
- des concentrations en métaux lourds (Pb, Zn, Cu, Cd, Ni) élevées, en surface essentiellement, ainsi qu'en hydrocarbures aromatiques polycycliques dans les sols urbains et industriels. Ces polluants, stockés et peu mobiles dans les sols, représentent des sources secondaires de pollution diffuse dans le sous-sol, les eaux superficielles par érosion/ruissellement, les eaux souterraines et l'atmosphère ;
- un manque de connaissance sur les concentrations de certains polluants émergents (les platinoïdes, les retardateurs de flamme, certains pesticides ou résidus médicamenteux ou les composés aromatiques polaires issus de l'oxydation des HAP).

2.2. Impacts de l'artificialisation sur les organismes et la biodiversité des sols

De par leur structure, la diversité de leurs caractéristiques physicochimiques et des conditions microclimatiques, les sols abritent un nombre considérable et une très grande diversité d'organismes (environ un quart des espèces animales décrites).

Les microorganismes représentent les principaux organismes des sols en termes de biomasse et de biodiversité. Ils sont essentiels pour le fonctionnement des écosystèmes terrestres et en particulier des sols (cycles biogéochimiques, fertilité, régulation des flux de gaz et d'eau...). Pour simplifier la présentation de cette diversité d'organismes, les espèces sont regroupées selon leur taille (Figure 2-6).

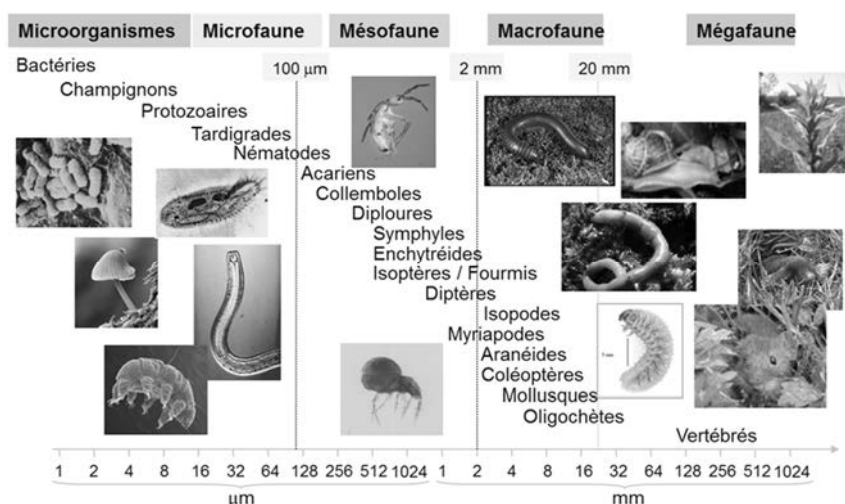


Figure 2-6. Illustration de la diversité des organismes de la faune du sol, des plus petits (bactéries, protozoaires) aux plus grands (lombrics, batraciens, vertébrés). Source : Éric Blanchart (IRD)

L'analyse s'appuie essentiellement sur des études de sols artificialisés réalisées en situation "réelle" (zones urbanisées, alentours d'installations industrielles ou minières), et non en conditions expérimentales. Les catégories d'artificialisation les plus étudiées sont de loin l'urbanisation (souvent sans plus de précisions sur la nature des perturbations subies par le sol) et les activités minières ou industrielles (Encadré 2-4). Les mesures de diversité (composition fonctionnelle et structure taxonomique) sont les plus utilisées pour estimer l'effet de l'artificialisation (29% et 23%, respectivement) ; viennent ensuite les mesures d'abondance et de biomasse (17% et 12%, respectivement). Les autres mesures, comme les indices de réseaux ou la bioaccumulation, sont plus anecdotiques et représentent moins de 20% des cas (voir Figure 2-6).

Encadré 2-4 - Le corpus bibliographique et son analyse

Le corpus retenu comprend 209 articles scientifiques, majoritairement publiés dans les années 2000. Les études proviennent principalement d'Europe (65%). Le jeu de données est très équilibré entre les trois groupes d'organismes (36% macrofaune, 32% méso-microfaune, 31% microorganismes). Les catégories d'artificialisation les plus étudiées sont l'urbanisation et les activités minières ou industrielles (Figure 2-7.A). La plupart des études sont réalisées à l'échelle des communautés d'organismes. Ces communautés microbiennes et d'animaux du sol peuvent être caractérisées par divers indices écologiques : leur abondance et leur biomasse ; leur composition, taxinomique ou fonctionnelle ; leur structure, taxinomique ou fonctionnelle (Figure 2-7.B).

Ce corpus a fait l'objet d'un dépouillement systématique. Un même article scientifique pouvant comporter plusieurs résultats (portant sur des groupes d'organismes ou des indicateurs de réponse des organismes différents), chaque publication a été décomposée en résultats élémentaires. Le corpus comprend ainsi 582 informations élémentaires. Pour chacune, le résultat obtenu par l'étude a été qualifié, par l'appartenance à une classe d'effet et, quand cela était possible, par un score (de -1 pour un effet très négatif à +1 pour un effet très positif ; 0 pour l'absence d'effet). Ce score individuel permet de calculer, pour un type d'effet donné (un facteur d'artificialisation pour un groupe d'organismes et pour un indicateur de réponse), un score moyen sur l'ensemble des publications concernées (voir Figure 2-6).

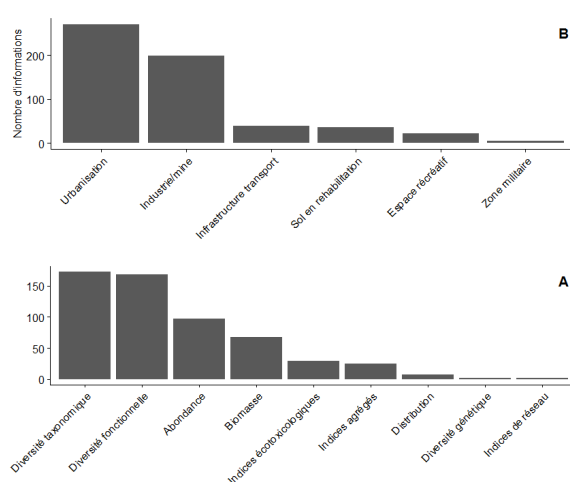


Figure 2-7. Les usages des sols étudiés (A) et les variables de réponses mesurées (B) dans le corpus analysé

2.2.1. Effets sur les différents groupes d'organismes

Les facteurs d'artificialisation sont décrits de façon très hétérogène dans les articles. Dans le cas des activités industrielles/minières et des infrastructures routières il est possible de connaître relativement précisément à quoi correspond le gradient de pression environnementale (pollutions métalliques, HAP...) ou de destruction/fragmentation des habitats. Mais dans la quasi-totalité des études traitant de l'urbanisation, il est souvent impossible de décomposer la contribution des différents facteurs d'artificialisation (fragmentation/disparition d'habitat, pollution, imperméabilisation, ...). Par ailleurs, La plupart des études comparent entre eux des sols en contexte urbanisé pour des types d'usage différents ou bien comparent des sols urbains à des sols « analogues » en contexte rural, mais ils sont souvent différents d'un point de vue pédologique et donc difficilement comparables, et il n'existe pas de consensus sur les sols de référence (cf § limites). Nous décrivons ci-dessous les résultats par groupes d'organismes avant de présenter les résultats globaux sur la biodiversité des sols (2.2.2).

• Effets sur les microorganismes

L'analyse synthétique des effets des différents facteurs d'artificialisation sur les mesures de diversité ou sur les groupes taxonomiques des microorganismes montre que globalement, les effets sont négatifs à très négatifs. Il existe cependant une réelle difficulté à choisir les sols de référence pour estimer les effets. Certaines études mettent en évidence un effet de fertilisation (via des retombées atmosphériques azotées ou l'apport de compost ou d'engrais aux espaces verts urbains) qui peut expliquer certains impacts positifs de l'urbanisation sur les communautés microbiennes.

Les études sur l'impact d'activités industrielles ou minières et du trafic routier concernent principalement des contaminations par des métaux lourds (locales ou plus diffuses, autour des sites) ou par des HAP (hydrocarbures aromatiques cycliques), et rapportent très majoritairement des effets négatifs, en particulier sur la biomasse et/ou l'abondance microbienne, et sur des variables d'activité microbienne.

En contexte urbain, les études mettent en évidence les effets négatifs de l'urbanisation sur la biomasse ou l'abondance microbienne ainsi que sur l'activité microbienne des sols, mais il est difficile de distinguer les effets des différents facteurs d'artificialisation. L'urbanisation inclut des perturbations physiques (enlèvement ou mélange des horizons de sol, imperméabilisation, compaction), chimiques (dépôts atmosphériques, fertilisation) ou écologiques (élimination ou remplacement de la végétation) des sols, et elle induit une forte hétérogénéité de sol avec des propriétés et des pratiques différentes, et donc des effets variables sur les microorganismes. Tous les résultats présentés ci-dessus concernent des sols artificialisés mais « ouverts » : l'imperméabilisation conduit toujours à des effets négatifs avec une forte réduction de la biomasse et de l'activité des microorganismes du sol.

D'une manière générale, on constate une faiblesse de la littérature disponible sur ces questions de l'évaluation de l'impact de l'artificialisation des sols sur les microorganismes, au regard de l'importance de ces derniers dans de nombreux processus et services écosystémiques portés par les sols (fertilité du sol, purification de l'eau, séquestration du carbone...) L'évaluation de l'impact de l'artificialisation des sols sur la diversité microbienne sensu stricto et sur les réseaux d'interactions dans les sols, reste très marginale, alors que les nouvelles méthodes de séquençage massif permettraient désormais d'aborder ces questions et, combinées aux approches fonctionnelles, d'évaluer les conséquences de changement de diversité microbienne sur les processus écosystémiques portés par les sols.

• Effets sur les méso- et micro-invertébrés

Les effets de l'environnement urbain sur la micro- et mésofaune varient en fonction des sites de prélèvements et des paramètres mesurés, et en fonction de la gestion des sites urbains. Plusieurs études montrent une biodiversité plutôt favorisée dans les milieux urbains par rapport à d'autres écosystèmes fortement anthropisés, notamment agricoles. Une étude récente portant sur environ 760 échantillons représentant tous les types d'occupation du sol en France (dont 30 de jardins potagers urbains) a démontré que les sols prélevés en contexte urbain comportaient une biodiversité bien plus élevée en collemboles et acariens que la plupart des sols agricoles. C'est notamment le cas pour les sols de jardins familiaux riches en matières organiques, et qui présentent une diversité de micro-habitats très favorables au développement de communautés diversifiées. C'est également le cas pour certains écosystèmes particuliers, qui se créent dans des toitures végétalisées, des ouvrages de gestion des eaux pluviales (bassin de rétention/infiltration) ou des remblais sur décharge. Il apparaît possible d'améliorer les Anthrosols pour qu'ils soient plus favorables au développement de la biodiversité, notamment en renforçant les apports de matières organiques (projet *Biotechnosol – Gessol 3*).

En revanche, les activités d'extraction minières ou industrielles affectent négativement les communautés de micro- et mésofaune, avec des effets généralement bien plus marqués qu'en contexte urbain, du fait de pollutions ou de modifications des sols souvent bien plus sévères.

• Effets sur la macrofaune

Globalement, la macrofaune des sols est également négativement impactée par l'artificialisation des sols. Que ce soit sur les araignées, les carabiques, les fourmis, les cloportes ou d'autres macro-invertébrés, les conclusions sont congruentes et permettent de dresser un patron de réponse de la diversité des macro-invertébrés au gradient d'urbanisation. Des situations positives apparaissent lorsque l'on étudie le vieillissement des sols urbains ou les pratiques de réhabilitation/restauration des sols. Concernant les variables de réponse, la composition fonctionnelle des communautés est négativement impactée par tous les facteurs d'artificialisation, ce qui en fait un indicateur binaire (oui/non). Les indices de diversité taxonomique, de composition fonctionnelle et les mesures d'abondance présentent une gamme de réponses en fonction des facteurs d'artificialisation, et sont donc pertinents pour évaluer l'intensité des différents facteurs d'artificialisation. Il est par conséquent impératif d'étudier la réponse à l'artificialisation avec une combinaison d'indicateurs biologiques/écologiques.

Les communautés présentes dans les villes sont dominées par un faible nombre d'espèces et tendent à être composées d'une proportion moindre d'individus détritivores (sols moins riches en matière organique) et d'espèces spécialistes des milieux forestiers (même dans les habitats forestiers rémanents dans les villes). D'autre part, elles hébergent des proportions plus importantes d'individus de petite taille (contraintes énergétiques), à fortes capacités de dispersion, préférant les habitats ouverts, moins humides et plus chauds. Les espèces généralistes à distribution biogéographique large sont surreprésentées en zone urbaine. De même, les espèces exotiques, invasives, ou opportunistes peuvent trouver des environnements plus proches de leur zone biogéographique d'origine en milieu urbain, notamment grâce au microclimat urbain.

L'abondance des arthropodes terrestres près des sites de contamination liés à l'industrialisation, aux infrastructures ou mines est diminuée en général. Cette réduction s'explique par les effets négatifs importants sur les arthropodes du sol, en particulier sur les décomposeurs et les prédateurs.

2.2.2. Synthèse des effets de l'artificialisation sur la biodiversité des sols

Les effets observés dans les articles analysés apparaissent systématiquement négatifs à très négatifs pour toutes les formes d'artificialisation (Figure 2-8), sauf pour les sols réhabilités, pour lesquels la plupart des indicateurs sont neutres ou positifs, et dans une moindre mesure pour les « espaces récréatifs » qui regroupent eux-mêmes une grande diversité de situations, depuis les terrains de sport aux parcs ou jardins potagers urbains. Ce résultat indique un potentiel de réversibilité de l'impact de l'artificialisation sur les organismes du sol, au moins lorsque cette réhabilitation est possible. Parmi les usages les plus documentés, les sols des infrastructures et des activités industrielles et minières sont globalement les plus fortement impactés du point de vue des organismes du sol, aussi bien en termes de diversité taxonomique que de composition. Les quelques études portant sur des sols imperméabilisés (revêtements routiers, pavage / dallage en zone résidentielle) montrent toujours des effets très négatifs de l'imperméabilisation sur les communautés microbiennes du sol, en relation avec l'absence de végétation, et l'absence d'échanges (eau, nutriments) avec la surface. Nous n'avons relevé aucune étude concernant la faune du sol, alors même que cette dernière est probablement également lourdement affectée par cette imperméabilisation.

L'artificialisation liée aux industries et à l'exploitation minière a des effets très localisés (installations) et/ou diffus (zones aux alentours des installations affectées par les dépôts atmosphériques, les déblais...). L'impact de ces activités est généralement lié à la contamination des sols par des composés clairement identifiés (métaux lourds, dépôts azotés ou soufrés, éléments en traces). Les études disponibles montrent une certaine variabilité de l'impact de ces contaminations sur les micro-organismes du sol, alors qu'un consensus sur des effets négatifs à très négatifs apparaît pour la faune des sols. Cette variabilité pour les microorganismes s'explique par les différences de biodisponibilité des contaminants, liée aux caractéristiques du sol (pH, texture, CEC...), et par les différences de sensibilité des microorganismes et des fonctions microbiennes considérées. Un point important concerne la résilience des communautés : des effets négatifs sont observés longtemps après la fermeture des installations, avec des structures de

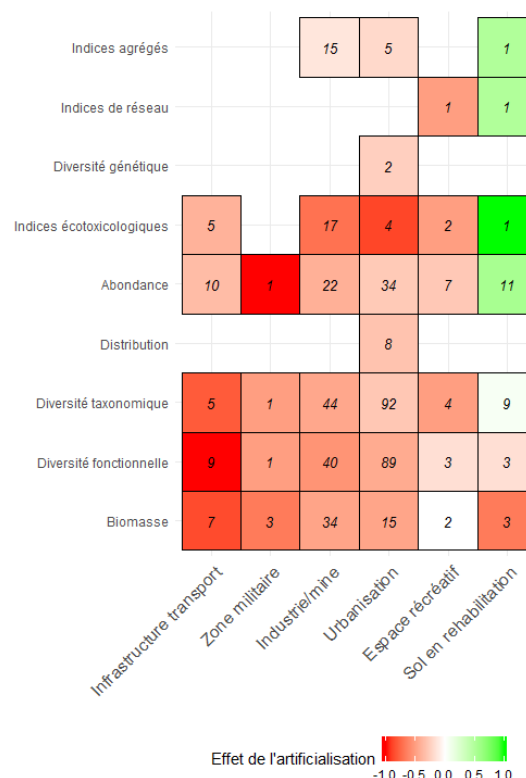


Figure 2-8. Effet des usages des sols sur les variables de réponse de l'ensemble des organismes du sol. Les codes abscisses et ordonnées sont donnés dans la Figure 2.5. Les chiffres dans les cases correspondent au nombre d'informations élémentaires utilisées.

communautés encore marquées par la perturbation ou le stress induits. La "restauration" des écosystèmes passe généralement par une revégétalisation, mais il s'agit souvent au mieux d'une réhabilitation, considérant que les fonctions recherchées peuvent être retrouvées, sans que l'écosystème final soit équivalent à son état initial.

L'artificialisation liée à l'urbanisation implique des facteurs variés et souvent en combinaison : altération physique des couches supérieures du sol, contamination par des composés liés, par exemple, au trafic automobile (métaux lourds, hydrocarbures, ...), imperméabilisation, compaction, pratiques de gestion (par exemple, dans les espaces verts urbains : fertilisation, traitement pesticide, arrosage, exportation des litières et des tontes de gazon...). Dans ce contexte, il est difficile de caractériser l'effet relatif de ces différents facteurs d'artificialisation.

Dans les études sur l'urbanisation ne ciblant pas des contaminants, le rôle de la matière organique des sols apparaît assez central. Les travaux comparent fréquemment les sols "urbains" à des "analogues ruraux", mais ces sols sont souvent différents d'un point de vue pédologique et donc difficilement comparables.

Les informations collectées dans cette ESCo confortent plusieurs hypothèses écologiques. Celle de "convergence des écosystèmes urbains" suggère que les facteurs anthropiques (gestion, pratiques) sont des facteurs de contrôle plus importants que les facteurs environnementaux (matériel parental/substrat géologique du sol, climat...). Dans de nombreuses études, l'augmentation de la pression environnementale aboutit à une diminution des valeurs de biodiversité, suivant l'hypothèse de la "perturbation croissante" en fonction du gradient d'artificialisation qui, lui-même, peut être combiné avec une baisse de la disponibilité en ressources, ou d'autres pressions (effet cocktail). Toutefois, une variable de biodiversité mesurée (par exemple le nombre d'espèces) peut aussi rester inchangée le long du gradient d'artificialisation, mais avec une diminution des populations de spécialistes d'un habitat quand la pression environnementale augmente, au bénéfice des espèces généralistes.

2.3. Conclusion : des leviers pour limiter les impacts de l'artificialisation sur les propriétés des sols et les conditions de la réversibilité des usages

L'impact de l'artificialisation sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols leur permettant de continuer à assurer au mieux l'ensemble de leurs fonctions sera d'autant plus faible et réversible que ces propriétés auront été prises en compte et préservées au maximum au moment des projets et chantiers d'aménagement. Il faut ici distinguer les trois grandes catégories de sols artificialisés.

Pour les sols construits (17 % des sols artificialisés en 2014 selon TL), la marge de manœuvre est réduite : la limitation des impacts passe par les différentes solutions de végétalisation des façades et toitures, et surtout par la gestion des sols environnant les bâtiments en favorisant infiltration et végétalisation (cf. chap. 3). Il est clair que la réversibilité sera dans tous les cas très difficile, coûteuse à mettre en œuvre et donc très rare (figure 2.9). Elle suppose en effet la destruction des constructions, l'évacuation des matériaux technogéniques, puis la mise œuvre des techniques du génie pédologique (cf. infra). Des exemples de « land recycling » et une analyse de ce concept sont présentés dans un récent rapport de l'EEA¹².

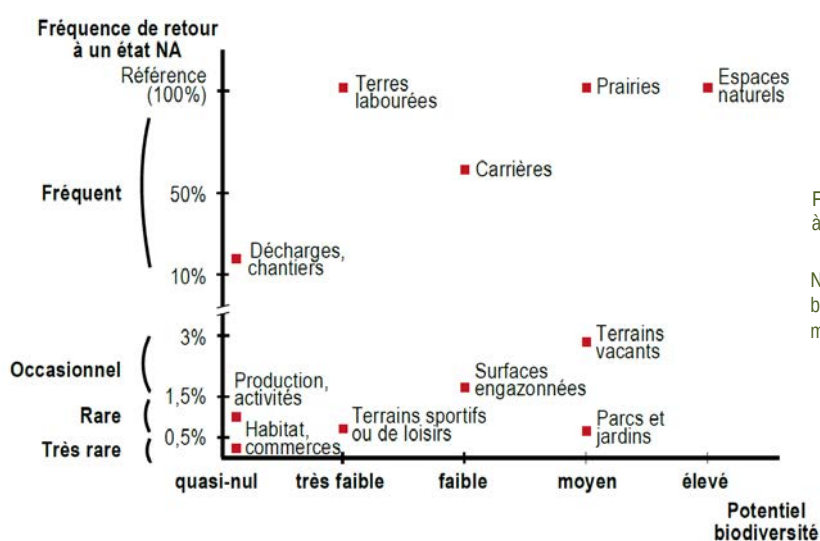


Figure 2.9 : Potentiel biodiversité et fréquence de retour à un état non artificialisé observé en Île-de-France sur la période 1999-2012 (d'après Colsaet, 2017).

NB : Les usages sont basés sur le MOS IdF et le potentiel biodiversité correspond à l'indicateur BioMos (intérêt moyen pour la biodiversité, à dire d'experts)

¹² EEA Report, 2016. *Land recycling in Europe - Approaches to measuring extent and impacts*. No 31/2016. Luxembourg: Publications Office of the European Union, doi:10.2800/503177

Pour les autres sols imperméabilisés, les sols revêtus ou stabilisés (47 % des sols artificialisés), la littérature scientifique et technique montre que différentes techniques peuvent être envisagées et testées pour réduire l'imperméabilisation des surfaces et les risques d'érosion ou améliorer les propriétés biologiques des sols. Des revêtements semi-perméables peuvent remplacer les surfaces scellées pour favoriser l'infiltration de l'eau. Elles sont constituées de dalles ou pavés séparés par des joints remplis d'un matériau perméable (type sable riche en matière organique). Ce système joue un rôle de filtre des eaux pluviales et favorise les flux entre la surface et le sol ; il a toutefois tendance à se colmater en vieillissant. Une telle option concerne plus particulièrement les surfaces de parking et les surfaces périphériques aux infrastructures de transport ou aux entrepôts logistiques et représente donc un potentiel important. Les réseaux de fossés de drainage ont un rôle particulièrement important, car ils peuvent améliorer à la fois la réinfiltration et le piégeage des sédiments. Cependant, leur efficacité peut diminuer avec le temps en l'absence d'entretien du fait des accumulations de dépôts. Ils constituent aussi des linéaires végétalisés favorables à la biodiversité. La réversibilité de ces surfaces est potentiellement plus importante que pour les sols construits mais peut, dans certains cas, être contrainte par des problèmes de contamination, et dans ce cas il faudra faire appel à des techniques de dépollution (cf. infra) souvent lourdes et également coûteuses. La réversibilité effective est probablement très faible, en particulier dans le cas des formes linéaires (voiries, infrastructures de transport) du fait de leur valeur d'usage, alors que les formes aréolaires (friches urbaines ou industrielles) ou encore les sols simplement stabilisés (emprises latérales des linéaires imperméabilisés) peuvent faire l'objet de techniques de remédiation, de reconstitution ou même de construction de sols (cf. infra).

Les sols artificialisés non imperméabilisés, nus ou enherbés/végétalisés, qui, d'après TL, représente en 2014 plus du tiers des sols artificialisés, constitue une groupe très hétérogène (jardins d'agrément ou potagers, terrains de sport et de loisir, mais aussi chantiers, carrières, sites miniers, etc.). Il présente néanmoins le plus important potentiel de limitation des impacts environnementaux et de réversibilité. La figure 2.9 illustre en particulier la réversibilité effective non négligeable des carrières ou décharges, sachant que dans la classification adoptée, « réversibilité » ne signifie pas que le sol a retrouvé des caractéristiques équivalentes à un sol « naturel ».

Un premier impact de ce type d'artificialisation correspond au risque d'érosion hydrique au moment des chantiers et pour les sols qui restent nus. De nombreuses études techniques ont montré, par comparaison avec des sols nus, la grande efficacité des méthodes anti-érosives en milieu urbain, comme une couverture végétale ou de paillis de copeaux de bois, qui peuvent réduire l'érosion jusqu'à 80 %. Les observations de terrain mettent toutefois en évidence que ces méthodes ne sont pas aussi efficaces qu'attendu en raison de mises en œuvre de techniques inappropriées et surtout trop tardives (60-80 % de l'érosion intervenant lors de la phase initiale de chantier).

Pour ces sols non scellés, une application initiale de matière organique (MO) en grande quantité, ou plusieurs apports successifs lorsque l'espace artificialisé le permet, semblent être une solution efficace pour maintenir ou construire des stocks de carbone dans les sols artificialisés et en améliorer directement certaines fonctions telles que la capacité de rétention en eau, la réserve d'éléments nutritifs, le développement de végétaux et, indirectement, la régulation des flux hydriques et du climat local par l'atténuation des émissions des gaz à effet de serre. Il a, par exemple, été montré qu'un apport de compost sur 60 cm de profondeur permet, après 4 années, la formation d'agrégats stables, entre 15 et 30 cm, dans lesquels la matière organique est protégée.

Les sols miniers sont relativement instables et peu cohérents de par leur texture, leur charge en éléments grossiers et leurs teneurs réduites en nutriments et matière organique. Toutes les études concluent à la nécessité de procéder à une remédiation des zones minières pour limiter l'érosion et les risques de pollution, et permettre l'implantation rapide d'une végétation. Les essais de remédiation de ces sols impliquent tous des apports d'amendements (pour corriger le pH, améliorer la teneur en MO et la CEC) et d'engrais. Ces apports permettent de réduire la phytodisponibilité des ETM et d'augmenter l'activité biologique et la fertilité, favorisant ainsi l'installation de la végétation spontanée ou plantée, conduisant ainsi à une certaine réversibilité de la dégradation de ces sols.

Les friches industrielles se caractérisent par une large diversité d'origine des contaminations, se traduisant par des pollutions de sols à dominante minérale ou organique et souvent par des multicontaminations. Le choix du ou des procédés de dépollution des sols (physique, chimique ou biologique) et de la localisation de mise en œuvre (traitements *in situ*, sur site, hors site et/ou confinement) est alors orienté par la nature des polluants présents et par leur risque de dissémination dans l'écosystème et vers l'Homme, tout en prenant en compte les objectifs d'aménagement des sites. Des évolutions récentes dans la démarche de gestion des sites et sols dégradés visent à les considérer comme des ressources en intégrant en particulier des étapes ultimes de refonctionnalisation écologique des sols et, plus largement, de l'écosystème initialement pollué. Des procédés du génie écologique (e.g. génie pédologique, génie végétal) sont alors développés afin que les friches industrielles traitées rendent à nouveau des services.

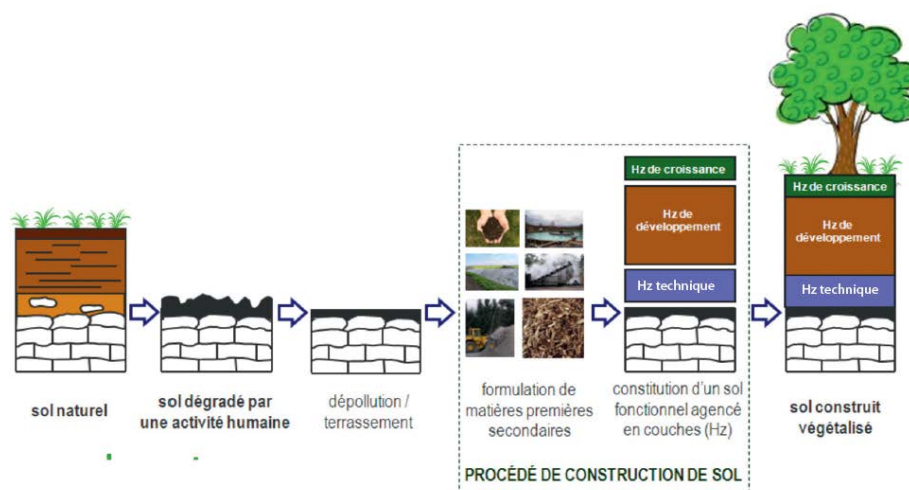


Figure 2.10 : Schéma illustrant différentes étapes de la mise en œuvre du génie pédologique pour la construction de sol et la refonctionnalisation écologique de sites dégradés (d'après Séré et al., 2008).

La construction de sol est un procédé du génie pédologique (Figure 2.10) qui vise la mise en place d'un sol structuré en couches ou horizons fonctionnels (Anthroposol construit). Ce procédé repose sur la formulation de sous-produits et déchets organiques et/ou minéraux, mettant en œuvre des matériaux délaissés ou faiblement valorisés. Il s'agit de formuler des matériaux entre eux afin de construire des sols fonctionnels, avec les propriétés recherchées, permettant la production de différents services écosystémiques (production de biomasse, hébergement de biodiversité, filtre et stockage d'eau, stockage de carbone, régulation climatique). La construction de sols se distingue de la reconstitution de sols par l'utilisation très majoritaire de matériaux technogéniques exogènes.

2. 4. Limites des études disponibles et identification des besoins de recherche

Les études actuelles ne permettent pas de dresser un diagnostic complet des effets de l'artificialisation des sols sur les propriétés physico-chimiques et sur les communautés d'organismes du sol, notamment du fait de l'impossibilité de décomposer la contribution des différents facteurs d'artificialisation (pollution, disparition et fragmentation d'habitat, imperméabilisation ; cf. Chapitre 3). L'analyse des travaux disponibles met ainsi en évidence plusieurs points nécessitant des recherches complémentaires.

- Définir une **typologie commune/partagée** des sols artificialisés croisant usages et approche morphogénétique, en définissant des référentiels (profils pédologiques complets) et en prenant en compte la typologie des matériaux technogéniques constitutifs des sols et l'histoire de la formation des sols. Cette approche permettrait de préciser la stratégie d'échantillonnage associée à des méthodes statistiques pertinentes par rapport à l'objectif fixé.
- Développer une réflexion forte sur les **situations de référence** (ou "contrôles"), dont le choix oriente fortement les conclusions des études. L'évaluation des effets de l'artificialisation, en particulier sur la biodiversité des sols, pâtit fortement du manque de clarification de ce que sont/seraient les situations pédologiques et les occupations de sol de référence. Les connaissances dans ce domaine portent essentiellement sur les sols artificialisés pollués, mais finalement relativement peu sur les sols non pollués.
- Associer systématiquement des données et des informations de nature historiques aux évaluations de caractéristiques physico-chimiques des sols, et privilégier le suivi de la **dynamique temporelle** de ces propriétés et des patrons de réponse biologiques sur des pas de temps longs dans une logique d'observation pour se donner les moyens d'observer et de quantifier l'impact de l'artificialisation sur l'évolution des sols, puis de le modéliser ; associer à ces profils des données sur l'occupation du sol, la croissance démographique et économique, la typologie des usages. Il faut pour cela mettre en place des observatoires de mesure de la qualité des sols artificialisés (le RMQS pouvant être une base de développement) pour produire des bases de données utiles aux communautés scientifiques et aux acteurs de la gestion des sols. L'évaluation des pratiques de 'restauration' des sols après aménagements devrait être systématisée avec une approche avant/après pour pouvoir raciner les dynamiques de la biodiversité des sols artificialisés.
- Poser a priori la question de l'hétérogénéité des mesures pour ne pas "sur-interpréter" des écarts entre des mesures (notamment pour les polluants) pour lesquelles la variance est quelquefois supérieure à 200%.
- Poursuivre les efforts pour relier les sources de polluants en milieu urbain et leur présence dans les sols soumis à cette artificialisation et ainsi progresser sur la connaissance de leur temps de séjour et leurs circulations dans l'environnement.

- Aller de la mesure des niveaux totaux de concentrations en certains polluants vers la **caractérisation de l'exposition des organismes cibles aux polluants** via le sol et ainsi évaluer les risques pour les écosystèmes et la santé de l'Homme. En effet, les études existantes ne permettent pas une telle analyse. Quelques-unes portent sur les risques liés à l'ingestion de sol (risque le plus majorant) par les enfants en bas âge.
- Etudier d'autres contaminants que les métaux lourds ou les hydrocarbures, tels que les nanoparticules ou les détergents, en "situation réelle". L'effet de l'utilisation de pesticides et des sels de déneigement en ville et pour les infrastructures de transport est également peu documenté dans le corpus étudié. L'impact sur les organismes du sol des perturbateurs endocriniens (présents à des concentrations croissantes dans les sols) n'est que très peu abordé. C'est aussi le cas pour des activités industrielles et minières en pleine expansion telles que la gestion des déchets électroniques et l'exploitation des gisements d'hydrocarbures non conventionnels par des procédés de fracturation hydraulique (qui utilisent de nombreux composés chimiques, dont des biocides anticorrosion).
- Accroître les connaissances sur d'autres groupes taxonomiques que les collemboles et les nématodes, même si ces derniers sont très représentatifs de leur groupe, comme les acariens ou les protozoaires. D'autre part, la concentration humaine (et d'animaux domestiques et synanthropiques) dans les villes augmente considérablement l'exposition aux germes pathogènes dont le développement serait favorisé par l'îlot de chaleur urbain, par un sujet en émergence. L'avènement de la métagénomique environnementale pourrait pallier le manque de spécialiste de chacun des groupes faunistiques en permettant des analyses haut-débit de la biodiversité des sols.
- Explorer les effets de la **matrice paysagère urbaine**. Si des développements récents ont concerné la macrofaune, très peu d'études à ce jour sont disponibles pour les micro-organismes, la microfaune et la mésofaune du sol.
- Développer des **indices de qualité des sols et des indicateurs fonctionnels des sols artificialisés** afin de permettre l'évaluation de la multifonctionnalité des sols dans les plans et projets d'aménagement du territoire.

3. Les impacts de l'artificialisation sur les caractéristiques et le fonctionnement des milieux artificialisés

Ce chapitre traite de l'impact de l'artificialisation sur différentes caractéristiques et sur le fonctionnement des milieux artificialisés, abordés ici à des échelles plus larges que dans le chapitre précédent : paysage, bassin versant ou, encore, quartier urbain... La première partie concerne les impacts de l'artificialisation sur les paysages, les habitats et les espèces végétales et animales (3.1). Dans la deuxième partie, sont abordés les impacts de l'artificialisation des sols sur l'hydrologie urbaine et la gestion des eaux pluviales urbaines (3.2). La troisième partie regroupe, comme précisé en introduction de cette synthèse, divers impacts plus indirects sur l'environnement physique urbain qui, s'il est possible de les maîtriser, peuvent jouer sur les phénomènes de périurbanisation et l'artificialisation des sols qui en découle. Les trois volets plus particulièrement étudiés concernent le microclimat urbain, la qualité de l'air et l'environnement acoustique (3.3). Comme on le verra, ces différents domaines se rejoignent sur de nombreux points, et particulièrement sur le rôle fondamental de la présence de végétation, ce qui souligne l'intérêt d'une approche pluridisciplinaire de la maîtrise des impacts environnementaux de l'artificialisation des sols.

3.1. Impacts de l'artificialisation sur les paysages, les habitats et les espèces végétales et animales

L'écologie du paysage définit les paysages comme des étendues d'échelle kilométrique composées de différents types d'occupation du sol, disposés de telle façon qu'ils facilitent ou non la circulation des organismes vivants. Les paysages sont donc caractérisés par leur composition et par leur configuration spatiale. La présence de corridors écologiques participe des continuités vertes (terrestres) et bleues (réseau hydrographique), promues notamment par la politique des Trames vertes et bleues mise en place en France en 2007 sur l'ensemble du territoire national, y compris dans les villes. Inversement, la fragmentation des paysages correspond à un éloignement entre les taches d'habitat, à l'absence de corridors écologiques et à des effets de barrière limitant le déplacement des organismes vivants.

L'artificialisation, et notamment la progression de l'urbanisation, affecte les paysages et les habitats environnants de manière directe, par les conversions d'habitats en surfaces dédiées aux activités humaines, et par la création d'infrastructures linéaires qui les fragmentent, et de manière indirecte, par les conséquences des modifications socio-économiques induites, comme la simplification des mosaïques paysagères, ou par les conséquences des modifications de l'environnement physique, comme la température de l'air ou des eaux de ruissellement (cf. sections 3.2 et 3.3).

Encadré - Le corpus et son analyse

L'impact environnemental de l'artificialisation des sols sur les habitats et la biodiversité terrestre a été évalué à partir d'un ensemble de plus de 300 références. Le niveau et la diversité taxonomiques considérés sont très variables. Certaines études ne concernent qu'une seule espèce, alors que d'autres comparent les communautés. La plupart des travaux sont spécialisés dans l'étude soit de la végétation, soit d'une communauté animale. Alors que les études centrées sur la faune sont essentiellement réalisées dans des régions de climat tempéré, celles sur la végétation représentent des domaines climatiques plus variés, incluant le domaine méditerranéen.

Ces références ont été analysées selon une grille visant à distinguer les points de consensus entre les travaux, les effets positifs ou négatifs de l'artificialisation en fonction des habitats et des espèces concernées. Dans un second temps, les résultats ont été quantifiés dans une méta-analyse détaillant les effets de l'urbanisation et de la fragmentation sur les habitats et les espèces (cf. Figure 3-1).

3.1.1. Méthodologie d'analyse de l'impact de l'artificialisation sur les habitats et la biodiversité

Les habitats, qui correspondent aux milieux de vie des espèces animales et végétales, sont définis par les conditions abiotiques (type de sol, densité de bâti), mais également par leur structure végétale (par exemple, la présence d'un couvert arboré sera propice à des plantes forestières supportant l'ombre, à des oiseaux nichant dans les arbres), par la présence de ressources pour le cycle de vie des espèces (notamment de ressources alimentaires pour la faune), voire par leur surface (les animaux ont besoin d'un domaine vital de taille variable selon l'espèce).

La biodiversité est considérée selon différents niveaux d'organisation : la diversité génétique, la diversité des espèces au sein des communautés vivantes, la diversité des écosystèmes. Pour mettre en œuvre ce type d'analyse, les auteurs ont généralement recours aux outils et concepts issus de l'écologie du paysage et en particulier aux indices paysagers, à l'écologie

urbaine, ainsi qu'à la "*metacommunity theory*" qui lie les facteurs locaux (biotiques et abiotiques) au sein d'un habitat et les facteurs paysagers affectant la dispersion des communautés.

Les conséquences de l'artificialisation sur la biodiversité vont être appréhendées en fonction de la composition (proportion de bâti, par exemple) et de la configuration du paysage (diversité, fragmentation, connectivité...). D'une manière générale, les travaux d'écologie considèrent que les facteurs environnementaux agissent comme un filtre qui sélectionne les espèces. Dans le cas de l'urbanisation, ce filtre environnemental résulte de la conjonction entre : d'une part, des facteurs agissant à l'échelle locale, comme la constitution d'habitats très particuliers (sols remaniés, construits ou imperméabilisés, forte proportion de bâti, jardins) et des perturbations liées aux pratiques anthropiques (introduction d'espèces exotiques, entretien mécanique ou chimique des couverts, piétinement, dérangement), et d'autre part, des facteurs à l'échelle du paysage, tels que l'isolement des habitats favorables aux espèces et l'effet de barrière gênant leur circulation.

Ce filtre a un effet sélectif sur les espèces en fonction de leurs caractéristiques biologiques et de leurs préférences en termes d'habitat. Seules certaines espèces vont supporter les conditions environnementales et paysagères, voire prospérer et devenir abondantes, dans les milieux artificialisés. Cet effet sélectif résulte généralement en une diminution de la richesse et de la diversité floristiques ou faunistiques globales. Toutefois, le long de gradients de densité urbaine, on peut éventuellement observer à l'interface entre milieux agricoles/naturels et milieux urbains une zone de mélange entre deux pools d'espèces, celles favorisées par l'urbanisation et celles propres aux milieux naturels ou agricoles. Cela explique que les pertes de diversité spécifique et fonctionnelle liées à l'artificialisation ne sont pas toujours associées.

Une hypothèse découlant de l'effet sélectif de filtre environnemental est celle d'une homogénéisation des communautés vivantes associée à l'artificialisation, c'est-à-dire une diminution de la diversité existant entre les diverses zones d'habitat dispersées dans la matrice urbaine. Enfin, une dernière hypothèse concerne les effets de l'artificialisation sur la diversité génétique des espèces et leur succès reproducteur. On suppose qu'une forte fragmentation de l'habitat d'une espèce sera défavorable à sa mobilité et à une fécondation croisée entre les sous-populations. Cela conduira à un relatif isolement des sous-populations et à une diminution de leur diversité génétique. Cette dernière hypothèse est généralement testée par des études réalisées sur une espèce végétale.

Ces hypothèses de travail sont sous-jacentes à l'analyse des résultats disponibles dans la littérature et guident les interprétations.

3.1.2. Effets de l'artificialisation sur les habitats et leur fragmentation

Des habitats fragmentés et détruits par l'artificialisation, qui peut aussi en créer de nouveaux. L'artificialisation connaît des formes et des temporalités différenciées, et touche diverses communautés animales et végétales. De manière générale, dans tous les articles, tout changement d'une occupation du sol "d'origine" (milieux naturels, forestiers ou agricoles) vers une occupation par du bâti ou des infrastructures de transport, est considéré comme négatif pour les habitats, en termes de connectivité et de fragmentation du paysage. Cependant, l'artificialisation n'entraîne pas qu'une dégradation et une disparition des habitats : elle génère aussi la création de nouveaux habitats urbains : espaces verts, parcs et jardins, dont le rôle ne doit pas être négligé. Le niveau de perturbation des habitats diminue quand la distance à la ville ou aux infrastructures de transport augmente. Plusieurs articles mentionnent par ailleurs la difficulté de séparer les variables d'influence, notamment celles associées aux routes (occupation du sol, bruit, trafic, chimie des sols, par exemple).

Un rôle crucial de la connectivité des habitats. Trois causes de la perte de connectivité ont été identifiées : la diminution des surfaces des habitats favorables, l'augmentation de la fragmentation de ces habitats et le développement des infrastructures de transport. Les trois entraînent un effet de barrière à la dispersion des plantes et aux déplacements des animaux. Aucun effet positif de ces infrastructures n'est mentionné explicitement. Cependant la fragmentation n'est pas directement proportionnelle à l'importance des infrastructures présentes. L'effet des infrastructures de transport n'est pas uniquement structurel (fragmentation), ces dernières induisent également des modifications physiques et chimiques de leur environnement proche.

Au-delà de l'occupation du sol, la configuration spatiale est importante : à surface équivalente d'habitat perdu, l'effet sur la perte de connectivité entre les taches d'habitat favorable est différent selon la densité des zones d'habitat, la distance entre elles et la présence d'éléments paysagers linéaires comme un corridor, par exemple.

3.1.3. Effets de l'artificialisation sur les espèces et les communautés végétales

Une forte influence des conditions environnementales locales sur la végétation. Les espèces végétales sont plus fortement influencées par les conditions environnementales locales (par exemple le taux de bâti observé sur le lieu de l'inventaire floristique) que par la configuration paysagère. Ceci s'explique par le fait que les plantes étant immobiles, elles subissent fortement les conditions du lieu où elles s'implantent, voire en sont des indicateurs. Toutefois, les espèces végétales dépendent elles aussi de paramètres paysagers, qui vont faciliter ou non la dispersion de leur pollen ou de leurs graines, que

cette dispersion soit assurée par le vent, l'eau, la faune, agents eux-mêmes dépendants de la configuration paysagère. Les conditions environnementales et, notamment, le type de sol, restent un déterminant important des assemblages d'espèces y compris dans un habitat très artificialisé tel que le milieu urbain.

Une sélection en faveur des espèces exotiques et généralistes. Presque toutes les études examinant non seulement le nombre, mais aussi le type d'espèces présentes ou abondantes concordent sur l'effet sélectif de la densité d'urbanisation, quel que soit le contexte, qui favorise les espèces exotiques (ou néophytes, invasives) et inversement défavorisent les espèces indigènes, archéophytes¹³ ou rares. Cette sélection est attendue, puisque les espèces exotiques ont pour partie été introduites intentionnellement, pour leurs qualités esthétiques ou fonctionnelles, en particulier en ville. Il en est de même le long des infrastructures de transport, les espèces exotiques étant favorisées jusqu'à 150 m de distance dans les prairies, et seulement à 10 m dans les forêts, confirmant la plus grande vulnérabilité des écosystèmes herbacés à l'artificialisation.

Le degré de spécialisation des espèces végétales est également analysé : l'artificialisation semble ainsi défavorable aux espèces associées à un habitat naturel, telles que les espèces des zones humides (hygrophiles) ou forestières, ou les espèces peu exigeantes en termes de nutriments (oligotrophes), alors que les espèces spontanées des friches et des chemins (rudérales) appréciant un enrichissement en azote du sol (nitrophiles) sont favorisées, de même que les plantes issues de bulbes ou rhizomes (géophytes) du fait de la fauche.

Au total, le bilan de ces études est largement en faveur d'une validation de l'hypothèse de sélection, avec des espèces généralistes qui apparaissent favorisées dans la plupart des études, et un bilan plus mitigé pour les espèces spécialistes. La présence d'habitat favorable, comme les friches ou les espaces verts, tend à favoriser d'une manière générale la richesse floristique. Dans certaines conditions, des espèces spécialistes qui sont normalement rencontrées dans des habitats naturels, et menacées dans les espaces agricoles et non exploités entourant les villes, peuvent être présentes lorsque ces habitats ont été préservés dans les villes. Cependant le lien avec l'intensification de l'agriculture n'a pas été pris en compte dans l'expertise. En effet, dans la plupart des articles, si des zones agricoles sont incluses, leur niveau d'intensité des pratiques agricoles n'est pas précisé. Outre le taux d'urbanisation, la taille des villes, leur ancienneté et la fragmentation des habitats favoriseraient les espèces généralistes par rapport aux espèces spécialistes. A l'inverse, une configuration avec des fragments d'habitat assez grands, des connexions écologiques, des paysages environnants non bâtis, aura un impact favorable sur l'ensemble des espèces, exceptées les espèces généralistes.

Des effets globaux contrastés sur l'ensemble de la flore. Il existe aussi un nombre non négligeable d'études n'ayant pas pu conclure quant aux effets de l'artificialisation sur les espèces végétales. Ces résultats plus ambigus sont obtenus dans les études testant le rôle de l'artificialisation sur l'ensemble de la flore, et non sur des espèces ou des habitats particuliers. Ainsi, la richesse floristique est tantôt défavorisée, tantôt indépendante du taux d'urbanisation ou des perturbations liées à l'homme. Certaines études soulignent la richesse floristique plus importante des villes, en particulier aux niveaux moyens d'urbanisation (contrairement à celle de la faune). Cela pourrait s'expliquer par un effet de l'assemblage des deux cortèges, indigènes et exotiques, mais aussi par un effet positif de l'hétérogénéité spatiale, en relation avec un découplage des effets négatifs de l'artificialisation sur la diversité spécifique et fonctionnelle.

Si les espèces exotiques jouent un rôle important dans les cas d'augmentation de la richesse floristique, les résultats tendent en revanche à invalider l'hypothèse de l'homogénéisation floristique. Certaines études comparant un nombre important de noyaux urbains et deux séries d'inventaires dans le temps montrent des effets d'homogénéisation à long terme du fait notamment des espèces exotiques, que l'on retrouve partout, mais d'autres indiquent une absence d'effet ou une homogénéisation partielle (certains statuts d'indigénat, certaines villes).

Pour ce qui concerne l'hypothèse de l'appauvrissement de la diversité génétique d'une espèce liée à la fragmentation des habitats, les résultats disponibles montrent des résultats variables, et le faible nombre d'études disponibles ne permet pas de valider cette hypothèse.

Un rôle important des interactions entre espèces végétales et animales. Les interactions biotiques, d'une part entre espèces végétales, et d'autre part entre les espèces végétales et animales, sont généralement un indicateur du bon fonctionnement des écosystèmes naturels. Elles peuvent être observées dans certains habitats semi-naturels urbains. Outre leur effet sur le succès reproducteur observé à l'échelle d'une espèce, dans certains habitats, tels que les friches, les espèces qui leur sont significativement associées sont entomogames, c'est-à-dire pollinisées par les insectes, la circulation de ces derniers étant facilitée par la connectivité de cet habitat le long d'infrastructures de transport abandonnées. De même, il peut exister une corrélation entre la richesse floristique et celle de certains groupes animaux dans ces habitats.

¹³ Les archéophytes sont des espèces introduites avant 1500.

Modalités de l'artificialisation	Type d'organismes	Effets sur la biodiversité						Nombre total de résultats
		Richesse en espèces	Abondance, présence	Sélection de généralistes	Sélection de spécialistes	Diversités (niveau gènes, écosystème, paysage)	Démographie	
Mauvaise qualité de l'habitat, perturbations	flore	-0,8	1	0,8	0			12
	faune	-0,9	-0,8	0,5	-1			24
Urbanisation et densité de la population humaine	flore	-0,1	0,3	0,8	-0,2	-0,7	-1	59
	faune	-0,7	-0,1	0,7	-0,6	-1		198
Infrastructures de transport, industries, mines	flore	-1		0,9	-1			7
	faune	-1	-0,9	0,5	-0,8		-1	45
Niveau intermédiaire d'urbanisation	flore	0,4		-1	0	-1		28
	faune	-0,1	0,4	0,5	0,7			86
Habitat urbain favorable (friches, espaces verts)	flore	0,8	1	0,6	0,9	-1		30
	faune	0,4	0,1	0,5	0,1			28
Taille de la ville, fragmentation des paysages	flore	0	-1	0,3	-1	0,2		14
	faune	0	0	1,0				9
Diversité, connectivité des habitats	flore	0,9		-0,2				16
	faune	0,8	0,6	1	0,5	1	-1	46
Nombre total de résultats		319	101	78	94	30	16	638

Figure 3-1. Indice moyen de l'effet de l'artificialisation des sols sur la biodiversité de la faune et de la flore et nombre total de résultats analysés. Chaque effet est transcrit par un indice compris entre -1 et +1, selon que l'effet est négatif ou positif, égal à 0 si l'effet n'est pas démontré. Les indices sont ensuite additionnés par groupes d'organismes (flore et faune) et par modalité de l'artificialisation puis divisés par le nombre de résultats correspondant. Un indice proche de 1 (cellule verte) correspond à des effets généralement positifs constatés dans l'ensemble du corpus concerné, alors qu'un indice proche de zéro (cellule jaune) indique des effets nuls, ou une compensation entre des effets positifs et négatifs selon les cas. Un indice proche de -1 indique des effets généralement négatifs (cellule rouge).

La comparaison des effets de l'artificialisation sur les organismes végétaux et animaux suggère une vulnérabilité plus importante de la faune. Cette tendance se vérifie pour l'impact de l'urbanisation sur la richesse spécifique, plus négatif pour la faune (indice de -0,7, calculé sur 129 résultats) que pour la flore (-0,1 ; 22). Inversement, l'impact des habitats urbains favorables est plus positif pour la richesse de la flore (0,8 ; 13) que pour la faune (0,4 ; 8). L'urbanisation a aussi un effet négatif sur la diversité de la faune et de la flore (-0,8 ; 19). La mauvaise qualité des habitats a également un impact plus négatif sur la faune (-1 ; 10) que sur la flore (-0,7 ; 9). Les niveaux d'urbanisation intermédiaires sont plus favorables à la richesse floristique (0,4 ; 13) que faunistique (-0,1 ; 66), ceci étant compensé par une plus grande abondance de la faune (0,4 ; 10).

3.1.4. Effet de l'artificialisation sur les espèces et groupes d'espèces animales

Globalement, l'artificialisation a un **effet négatif sur les organismes animaux**. Toutefois, ce résultat masque de grandes disparités entre échelles d'études, taxons et groupes écologiques et degré d'artificialisation.

La densité du bâti et du peuplement humain a ainsi un effet négatif sur la richesse spécifique, mais faiblement positif pour la présence et l'abondance des arthropodes, mammifères et oiseaux. Les conditions locales (pollution, perturbations, dérangements) ont un effet négatif sur l'ensemble des paramètres de la biodiversité des organismes animaux. Certaines espèces sont particulièrement sensibles à la proximité des activités humaines (loup gris, puma, lynx, chiens de prairie). Une bonne qualité de l'habitat est favorable aux espèces spécialistes, et défavorable aux espèces généralistes. C'est l'inverse pour l'urbanisation, les mammifères étant le groupe le moins affecté par cet effet de sélection. Certaines espèces de plus grande taille, généralistes ou domestiques, sont ainsi favorisées par l'urbanisation (renard roux par exemple), alors que c'est l'inverse pour les grands prédateurs (lynx, loup gris, puma...). Inversement, la présence d'espaces verts est favorable à la présence de mammifères en milieu urbanisé, à leurs déplacements entre des zones d'habitat favorable, et elle limite l'extinction d'espèces menacées. Il en est de même des zones de cultures et des zones humides présentes en milieu urbanisé.

Associée aux changements d'occupations du sol, la configuration du paysage joue également un rôle sur les animaux. Suivant le cadre théorique des filtres environnementaux, l'artificialisation à une échelle paysagère affecte essentiellement les espèces de la petite faune qui ont des capacités de dispersion réduites et qui se déplacent essentiellement sur le sol. Plus les organismes ont une affinité importante à l'habitat agricole ou forestier, plus ils seront affectés par la destruction de ces habitats. **L'impact de la fragmentation est maximal pour les espèces à faible capacité de dispersion et les espèces forestières ou encore pour des espèces spécialistes (ex. les carabes incapables de voler).** Les effets de l'artificialisation et de la fragmentation sont sélectifs selon l'espèce animale. Ils sont par exemple relativement neutres pour les oiseaux, favorables pour les rats laveurs, négatifs pour la grenouille verte ou le cerf de Virginie. Inversement, la connectivité des habitats facilite les déplacements des individus et favorise la pérennité des populations de l'ensemble des organismes. En conclusion, on observe des effets complexes de la fragmentation sur la faune mais assez clairement négatifs au-delà d'un certain seuil d'artificialisation.

L'accroissement des interactions entre animaux. L'urbanisation et la fragmentation des habitats naturels ont aussi tendance à augmenter le nombre d'interactions entre les espèces animales de manière **défavorable pour les espèces les plus spécialistes** du fait de la compétition avec les espèces généralistes quant à la disponibilité des ressources. Ces effets sont montrés pour la grande faune, dont les besoins alimentaires sont importants. Ils sont également mentionnés dans les études concernant les anciens sites miniers, dans lesquels la disponibilité réduite des ressources constitue un facteur limitant. Les interactions sont également favorisées par la perturbation du rythme biologique journalier associé à des comportements d'évitement des activités humaines, entraînant potentiellement la coprésence d'espèces animales en compétition au même moment de la journée. Ces effets de l'urbanisation sur l'augmentation des possibilités d'interactions sont liés à la perte d'habitats et à la présence d'espèces animales dans des zones de forte occupation humaine accompagnée d'animaux domestiques représentant un danger. Les effets de barrière et de conduit des infrastructures anthropiques poussent les espèces animales à emprunter les mêmes chemins pour se déplacer.

Des effets de seuil. Dans certaines études on observe des effets positifs de l'artificialisation ou de la fragmentation des habitats naturels jusqu'à un certain seuil. Des niveaux faibles à moyens de fragmentation augmentent l'hétérogénéité du paysage (et donc la diversité des habitats sur une surface donnée) mais au-delà d'un certain seuil, les effets deviennent majoritairement négatifs, et ceci pour des organismes très différents. Des richesses spécifiques, abondances ou proportions d'espèces spécialistes plus importantes sont détectées à des niveaux moyens d'urbanisation.

On observe des résultats concordants entre les études traitant des espèces animales et végétales, à savoir : 1/ que les espèces animales généralistes et les espèces végétales exotiques et rudérales sont favorisées par l'urbanisation, illustrant l'effet de 'filtre environnemental' ; 2/ que la connectivité des paysages est favorable à la faune et à la flore. En revanche, les études concluent sur **des effets négatifs plus importants de l'artificialisation sur la faune que sur la flore, notamment la densité d'urbanisation à laquelle la faune est plus sensible que la flore.**

Quelques travaux tentent d'intégrer les effets du changement climatique par échantillonnage à différentes altitudes ou par des simulations du changement climatique. Ils montrent des effets négatifs importants du facteur température et de la densité du bâti, voire leurs effets convergents sur certaines espèces.

3.1.5. Effets spécifiques des infrastructures routières et ferrées et des zones minières

Les infrastructures de transport, les zones industrielles et minières ont un effet généralement négatif sur la flore et la faune, les oiseaux étant toutefois moins affectés que les autres organismes. Les infrastructures routières ont un effet amplifié par rapport à leur emprise et à leur trafic. Des routes forestières avec peu de circulation peuvent représenter des coupures importantes car elles sont localisées dans des habitats encore préservés. Ces routes peuvent entraîner aussi des changements d'occupation du sol et des dérangements. Les routes sont généralement **défavorables aux déplacements**, une autoroute pouvant représenter une coupure franche. Les routes sont associées, par ailleurs, à une mortalité accrue de la faune du fait des collisions avec les véhicules.

Les voies ferrées peuvent constituer soit un obstacle, soit un lieu de vie. Elles peuvent aussi jouer un rôle de corridors de déplacement et ainsi favoriser la dispersion d'individus. La présence de végétation arborée peut aussi favoriser la présence ou le déplacement de certaines espèces au voisinage des routes. L'effet négatif des infrastructures de transport peut être atténué par l'aménagement de passages et par certains aménagements paysagers.

Les infrastructures de transport et notamment les routes sont, par ailleurs, souvent associées à des activités et/ou une présence humaines qui peuvent modifier le comportement et le cycle biologique des espèces animales.

Dans les zones minières, un premier constat est que les espèces animales sont généralement moins nombreuses. Les perturbations des milieux initiaux par des exploitations minières sont importantes et de diverses natures (coupes forestières, pollutions des sols...). L'impact de leur réhabilitation et, en particulier, de leur reconversion en milieu naturel a été étudié. La recolonisation de ces zones par les espèces animales est généralement observée, cependant elle peut s'effectuer à des vitesses différentes selon les espèces : les espèces animales présentes sont liées chronologiquement aux étapes de reconquête par les espèces végétales.

3.1.6. Conclusion et leviers d'action

D'une manière générale, si les analyses spatiales des changements de morphologie des paysages artificialisés convergent sur un diagnostic alarmant quant à leurs conséquences potentielles sur les habitats et la biodiversité, on observe aussi une grande variabilité dans leurs formes selon les cas d'étude. Les résultats sont liés à la façon dont est mesurée la biodiversité (richesse, abondance...), et aux groupes d'espèces sur lesquels porte l'attention des chercheurs. Même pour des hypothèses semblant très solides et validées, comme celle de l'homogénéisation biotique, on trouve des études apportant des nuances voire des cas contraires. Les résultats présentent donc une certaine complexité, avec des effets combinés ou contradictoires de certains facteurs. Cependant, l'intérêt de certains habitats, tels que les jardins ou les friches est largement souligné, ainsi que la prise en compte des terrains privés dans l'identification et la préservation de réseaux écologiques. Favoriser l'hétérogénéité des hauteurs de bâti et des strates végétales est favorable à l'abondance des oiseaux dans une ville dense. Un autre objectif d'aménagement régulièrement énoncé est de maintenir la connectivité entre les habitats favorables en construisant des passages à faune ou en aménageant des corridors écologiques d'une certaine largeur (>20 mètres).

Outre l'impact environnemental attendu des trames vertes sur la biodiversité, il ne faut pas oublier les bénéfices qu'elles peuvent apporter en termes de qualité de vie. Un outil longtemps mobilisé par les aménageurs pour limiter l'étalement urbain a été les ceintures vertes ; la largeur et l'emplacement de ces ceintures sont déterminants pour leur efficacité. La notion de services écosystémiques est également mobilisée, afin de démontrer l'intérêt économique et culturel des trames vertes et des espaces verts urbains. Un mécanisme délimitant l'extension des lotissements et les zones à préserver, associé à un mécanisme de compensation des pertes en sols perméables pourrait être proposé. La notion de résilience du "milieu" urbain pourrait aussi être mobilisée, en associant plusieurs principes d'aménagement et de planification urbaine, prenant en compte la morphologie des villes et leur diversité naturelle et culturelle : diminuer la consommation de terres, mettre en œuvre la trame verte, encourager les mobilités douces, protéger le patrimoine culturel et rural, concevoir des modèles de ville compacte.

Les effets de seuils de la densité urbaine démontrés par les études focalisées sur les espèces et groupes d'espèces devraient davantage être intégrés dans les propositions qui insistent surtout sur la limitation de l'étalement urbain. Cette politique de limitation de l'étalement, qui a maints avantages (limiter les pertes en terres agricoles et forestières, diminuer l'impact carbone des villes en réduisant les déplacements), devrait être accompagnée de mesures destinées à limiter, ou à compenser par des aménagements spécifiques, les effets de la densification urbaine dans le cœur des agglomérations. Les résultats montrent qu'un arbitrage est nécessaire entre la réduction des surfaces artificialisées, qui peut augmenter les impacts sur biodiversité, et le développement de mosaïques paysagères ouvertes, plus favorables à la biodiversité mais qui nécessitent plus d'espace.

3.1.7. Limites des études disponibles et identification des besoins de recherche

On regrettera une certaine déconnexion entre les études sur les pertes d'habitat, les changements de paysage et celles portant sur leurs effets sur les organismes vivants. De même, parmi les études traitant des organismes vivants, rares sont celles traitant conjointement d'organismes végétaux et animaux de différents types et prenant en compte les caractéristiques des sols, exception faite des revues de synthèse de la littérature. Cette déconnexion est probablement liée aux domaines de spécialité différents des chercheurs, et une approche pluridisciplinaire et pluri-taxons serait souhaitable. De telles études seraient précieuses pour orienter la prise de décision, en sachant que tel changement de paysage va avoir un effet sur telle et telle espèce végétale ou animale. La participation des sciences humaines et sociales serait très souhaitable, de façon à prendre en compte la perception de la biodiversité par divers groupes (habitants, jardiniers de la ville, etc...), afin de mieux orienter les recommandations. La production de cartes ou de plans recoupant ces informations (paysages, effet sur les organismes, perception par les acteurs et usagers) constituerait un plus.

On peut aussi déplorer un manque de suivi à long terme et d'études sur la viabilité des populations. Ceci est particulièrement vrai pour la faune, alors que la flore a été plus anciennement étudiée ce qui permet des comparaisons dans le temps. De même, les études sur la flore concernent des domaines biogéographiques plus variés, ou pour certaines, comparent un nombre non négligeable de villes, à l'échelle d'un pays ou du monde, alors que les études sur la faune sont souvent monographiques et mériteraient d'être étendues dans l'espace, pour comparer les effets de l'artificialisation en appliquant strictement les mêmes protocoles. Le même constat peut être fait pour ce qui concerne les travaux émettant, à partir d'un cas d'étude, des propositions d'aménagement de l'espace et de gestion des espèces susceptibles d'atténuer les effets négatifs de l'artificialisation. Des études testant la pertinence de ces préconisations simultanément dans plusieurs villes permettraient d'en mesurer l'efficacité selon différents paramètres (contexte socio-économique et culturel, domaines bioclimatiques, modèles urbains) et de mieux orienter les prises de décision.

Pour finir, il serait important de mieux distinguer les effets directs et indirects de la fragmentation : dans la majorité des études, les effets de la fragmentation sont extrapolés à partir des résultats des effets de changement de composition des paysages (essentiellement augmentation des surfaces minérales autour des sites, bâtiments, routes...), alors que peu d'études analysent les effets directs de la fragmentation et de la connectivité *sensu stricto* (largeur minimale d'un corridor, distance maximale entre deux taches d'habitat pouvant être franchie par une espèce, etc.).

3.2. Impact de l'artificialisation des sols sur l'hydrologie urbaine et la gestion des eaux pluviales

Parmi les déterminants de l'artificialisation des sols, l'urbanisation est celui qui est prépondérant dans les modifications du fonctionnement hydrologique, en augmentant fortement les flux de ruissellement et le risque d'inondation qui en résulte¹⁴. Elle affecte également la qualité des eaux ruisselées qui se chargent en polluants au contact des matériaux (enveloppe bâtie, revêtements de sol, mobilier urbain, véhicules...) et lessivent les polluants issus des activités anthropiques et déposés sur les surfaces. La gestion des eaux urbaines en aménagement se fonde sur l'échelle des bassins versants urbains mais pour ce qui se passe à l'exutoire des bassins versants, il est nécessaire d'évaluer les processus à l'échelle des quartiers et des ouvrages. Ces différentes échelles sont donc présentes dans l'analyse de la littérature.

L'histoire de la gestion du ruissellement comporte plusieurs périodes. Le développement des réseaux d'assainissement motivé par la salubrité et la santé publique, remonte au XIX^e siècle. Pour transporter les eaux usées hors de la ville, les urbanistes et ingénieurs ont fait le choix d'utiliser le réseau d'évacuation des eaux pluviales existant (option dite du réseau unitaire). Le traitement des eaux usées s'est généralisé dans la seconde moitié du XX^e siècle, accompagné par des réseaux séparatifs, distincts pour les eaux usées et les eaux pluviales. Il a fallu attendre les années 1970-80 pour que les impasses techniques et environnementales résultant du transfert rapide des eaux pluviales vers le milieu naturel apparaissent clairement, comme par exemple les pics de pollution liés aux rejets directs dans le milieu naturel lors des événements pluvieux et les inondations urbaines.

Une première réponse a été la création d'ouvrages centralisés de stockage et de décantation des eaux pluviales. Plus récemment, a émergé l'option d'un contrôle à la source des eaux pluviales, décliné en France sous l'appellation de "techniques alternatives" (au "tout tuyau"). Cette évolution marque un tournant dans la gestion de l'eau en milieu urbain, en y réintroduisant les différentes composantes du cycle de l'eau, et notamment l'infiltration. Simultanément, l'eau en ville redevient un atout environnemental, un élément d'agrément. Des efforts importants sont consacrés à la restauration des cours d'eau urbains. La végétalisation, consommatrice d'eau, améliore le cadre de vie, et serait susceptible de limiter l'effet d'îlot de chaleur urbain (cf. infra 3.3).

Encadré 3-1 - Le corpus bibliographique et son analyse

Le corpus analysé comporte 335 références, parmi lesquelles figurent 49 synthèses. L'origine géographique du corpus est la suivante : 151 documents d'Europe (en incluant la France), 66 des Amériques (essentiellement des USA), 20 d'Océanie, 17 d'Asie, et un d'Afrique. Les études de cas représentent 101 documents. La répartition des documents sur les différents thèmes est la suivante : 132 pour le thème « impacts sur le bilan hydrologique », 66 pour le thème « impacts sur la pollution des eaux pluviales », 92 pour le thème « les dispositifs alternatifs de gestions des eaux pluviales », 45 pour le thème/encadré « Acteurs, territoires, gouvernance et gestion ».

3.2.1. Impacts de l'artificialisation sur l'hydrologie

3.2.1.1. Impacts sur les processus hydrologiques

• Modifications des processus en surface et dans le sol

La pluie qui tombe sur des surfaces urbaines imperméables (toitures), ou revêtues/scellées (voiries, parkings...) génère en premier lieu à du ruissellement de surface, au détriment de l'infiltration et de l'évaporation. Les surfaces verticales interceptent, en présence de vent, une partie (non quantifiée) des précipitations. L'infiltration sur les surfaces revêtues/scellées n'est pas toujours négligeable du fait de la porosité et de la rugosité de ces surfaces, et l'évaporation à partir de ces surfaces reste significative en bilan annuel (de 10 à 25% de la pluie).

L'artificialisation des sols urbains (compaction du fait des usages et travaux, présence de remblais, nature et teneur en matière organique du sol...), modifie la structure et la texture du sol (cf. supra 2.1). Ainsi les dynamiques temporelles et spatiales de l'infiltration et des écoulements de sub-surface s'avèrent plus conditionnées par les effets de l'artificialisation que par les caractéristiques initiales du sol.

Les écoulements des eaux dans le proche sous-sol sont aussi modifiés par les effets des multiples réseaux qui parcourent le sol urbain. Les fuites des réseaux d'alimentation d'eau potable constituent un apport d'eau au sol parfois non négligeable. Les réseaux d'assainissement (eaux usées ou pluviales) et les tranchées dans lesquelles ils sont posés contribuent au drainage

¹⁴ Cette ESCo ne traite pas de la question de la vulnérabilité des constructions situées en zones inondables vis-à-vis des crues fluviales ou des inondations côtières dont le déterminisme dépasse largement la question de l'artificialisation des sols, et qui sont par ailleurs déjà fortement contraintes par la réglementation existante.

de l'eau du sol et évacuent parfois des volumes très significatifs (de 20 à 30% de la pluie annuelle à Nantes, par exemple). Des exfiltrations d'eau usée vers le sol se produisent également (estimées à une hauteur d'eau annuelle de 10 mm à Nottingham). La présence de pompes pour alimenter des activités urbaines et rabattre la nappe au voisinage d'infrastructures souterraines (parkings notamment) affecte le niveau des nappes souterraines.

• Impacts à l'échelle des bassins versants

Les bassins versants affectés par l'urbanisation présentent une très grande diversité de situations, depuis le bassin versant partiellement urbanisé ou en cours d'urbanisation (périurbain) jusqu'au bassin versant totalement urbanisé, équipé d'un réseau d'assainissement pluvial. Un bassin versant est souvent caractérisé par un coefficient de ruissellement défini par la proportion de la pluie qui se transforme en débit à l'exutoire durant un événement pluvieux. Lors d'événements pluvieux courants, ce coefficient est souvent significativement inférieur à la proportion des surfaces imperméabilisées. Sa valeur augmente avec l'importance des événements pluvieux, pour parfois dépasser le coefficient d'imperméabilisation.

L'influence de l'urbanisation sur le régime hydrologique des petits cours d'eau devrait théoriquement se traduire, dans un bassin versant urbanisé ou en cours d'urbanisation, par une augmentation des débits de crue et du débit moyen, et une baisse des débits d'étiage. Les observations sur le terrain conduisent à des conclusions moins nettes, voire différentes pour les débits moyens et les débits d'étiage, qui soulignent que les particularités de chaque bassin versant et de son réseau d'assainissement restent déterminantes.

Il a longtemps été admis que le développement urbain se traduisait nécessairement par une réduction de la recharge des nappes superficielles, et donc par une baisse de leur niveau. La littérature scientifique récente rapporte des exemples plus contrastés, de baisse mais aussi de hausse du niveau des nappes. La complexité des processus en jeu, le manque d'observations ainsi que l'importance de l'échelle considérée incitent à considérer avec prudence ces résultats.

L'artificialisation affecte également l'évapotranspiration, aujourd'hui centrale en milieu urbanisé du fait de son importance dans les bilans hydrologique et énergétique des zones urbaines. En milieu urbain, elle reste encore mal documentée. Sa mesure est peu fréquente, en raison notamment de difficultés méthodologiques (de transposition aux espaces urbains très hétérogènes de méthodes développées pour de grandes surfaces de végétation homogène). Elle est donc souvent estimée par modélisation sans réelle validation de ces résultats que l'on doit considérer comme des ordres de grandeur. Ces résultats indiquent que l'évapotranspiration représente une part importante du bilan hydrologique annuel, de 30% à près de 60% de la pluie annuelle pour des bassins versants imperméabilisés de 35% à 60% de leur superficie.

3.2.1.2. Impact sur la qualité des eaux pluviales

En milieu artificialisé, les infrastructures urbaines (chaussées, béton, équipements de sécurité, mobilier urbain) ou interurbaines (réseau routier), le bâti ou les activités commerciales et industrielles qui s'y déroulent, le trafic automobile, sont susceptibles d'émettre une grande diversité de polluants, que l'on retrouve dans les eaux de ruissellement pluvial.

Une attention particulière est portée dans la littérature aux rejets urbains de temps de pluie (RUTP) : ce terme désigne les rejets directs vers l'environnement d'effluents des réseaux unitaires, pratiqués lors d'événements pluvieux très intenses qui placent les stations d'épuration en situation de surcharge. Ces RUTP contiennent par conséquent les polluants présents dans les eaux pluviales et ceux des eaux usées.

• Sources et voies de transferts des polluants

Les émissions polluantes liées au trafic automobile peuvent être dues aux émissions des moteurs (gaz d'échappement, pertes de fluides sur la chaussée), et à l'usure des véhicules et des infrastructures (plaquettes de frein, pneumatiques, barrières de sécurité ou panneaux de signalisation, pots catalytiques...). Le trafic est la source très majoritaire d'émissions d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et une source de métaux (cuivre, zinc, antimoine, plomb, platinoïdes...). D'autres familles de polluants sont aussi susceptibles d'être relarguées par les matériaux constitutifs des véhicules (phtalates, alkylphénols, bisphénols).

Parmi les matériaux de construction, les toitures sont des sources significatives de métaux (cadmium, cuivre, plomb, zinc), et certains éléments en PVC (gouttières) peuvent émettre des alkylphénols, du bisphénol A, mais aussi des organoétains. Les bois de construction, revêtements de façades et toitures végétalisées peuvent être sources de biocides, observés par exemple après la construction d'infrastructures urbaines. La contamination des eaux de ruissellement peut se produire au cours des opérations d'entretien des bâtiments, de la voirie ou des espaces urbains (pesticides, fertilisants, sels de déneigement). Les politiques de réduction des émissions de certaines familles de polluants organiques se heurtent à une difficile détermination de leur origine, les molécules (le bisphénol A et les phtalates, par exemple) étant utilisées dans une large gamme de produits.

• Caractérisation des eaux de ruissellement pluvial

Les recherches récentes sur les eaux de ruissellement, réalisées dans le cadre des observatoires en hydrologie urbaine (réseau URBIS), confirment la présence de nombreuses familles de polluants (Encadré 3-2). Le transfert des eaux pluviales chargées en polluants dans les réseaux concentre, à l'exutoire des bassins versants, une pollution issue du mélange d'effluents provenant de zones d'activités diverses. La contamination des eaux pluviales en HAP, nonylphénol (NP) et certains métaux traces peut cependant être significative à l'échelle de la parcelle, avec une variabilité forte entre les événements pluvieux.

Dans les eaux pluviales, certains polluants sont majoritairement transportés par les particules (les HAP le sont à plus de 90%, le plomb et le chrome à plus de 80%), mais d'autres sont dissous (zinc et alkylphénols) ou bien répartis entre les deux fractions (cuivre, HAP légers...). Ce constat conforte l'intérêt de gérer les eaux pluviales en infiltrant une partie importante des volumes ruisselés au plus près de la source pour traiter la pollution dissoute, en ne se limitant pas à des traitements par décantation. Les gestionnaires sont en effet confrontés à la problématique des sédiments contaminés présents en fond d'ouvrages. La mobilité des polluants piégés dans ces matériaux dépend de nombreux paramètres : contexte géologique, conditions physico-chimiques, niveau des nappes sous-jacentes, etc. La végétation des ouvrages influence également les transferts ; quant aux microorganismes, ils présentent dans les ouvrages une spécificité liée à la qualité des eaux.

Encadré 3-2 - Les données sur les contaminations par les rejets pluviaux du projet ANR "Innovations pour une Gestion durable de l'Eau en Ville" (INOGEV) (voir le rapport complet pour des données chiffrées)

L'étude de trois bassins versants urbains dotés de réseaux séparatifs, représentant différents modes d'occupation des sols (pavillonnaire, résidentiel avec habitat collectif et individuel, et industriel ; situés respectivement en région parisienne, à Nantes et près de Lyon), a produit de nouvelles données sur l'effet de l'artificialisation des sols sur la qualité des eaux de ruissellement :

- des concentrations en métaux peu voire pas documentées, issus du bâti, des voiries et des activités humaines (arsenic, cobalt, molybdène, platine, strontium, titane, vanadium) ont été quantifiées. La plupart des concentrations mesurées dans les eaux de ruissellement dépassent les normes de qualité environnementale ;
- une différence de répartition des HAP entre fractions particulaire et dissoute, en fonction de leur poids moléculaire, a été mise en évidence, avec plus de molécules lourdes moins dégradables sur les particules ;
- de nombreux pesticides sont toujours détectés dans les eaux pluviales, malgré la diminution de leur usage pour l'entretien des espaces publics ;
- les premières données expérimentales sur les teneurs en PBDE (polybromodiphényléthers) dans les eaux pluviales ont été obtenues : le BDE-209 est toujours présent à des teneurs bien supérieures à celles des retombées atmosphériques, même si des différences significatives sont notées entre les différents sites. Les PBDE sont associés aux particules ;
- des substances (le bisphénol A et les alkylphénols) sont présentes majoritairement sous une forme dissoute, donc mobile.

• Impacts des rejets d'eaux pluviales sur les milieux aquatiques

Les impacts des polluants traditionnels (matières en suspension (MES), azote et phosphore) apportés par les rejets d'eaux pluviales ou des RUTP ont été étudiés depuis de nombreuses années. Les rejets de MES peuvent avoir des effets directs de colmatage sur le lit des cours d'eau ; l'oxydation des MES entraîne une baisse de la concentration en oxygène dissous des eaux, qui peut dans certains cas conduire à des mortalités piscicoles. Les MES sont également le vecteur des polluants présents en phase particulaire. Les rejets d'azote et de phosphore, dans les milieux aquatiques ayant des écoulements très lents ou relativement fermés (lacs et ruisseaux urbains, certaines baies), contribuent au phénomène d'eutrophisation.

L'évaluation de l'impact du rejet direct des eaux pluviales sur le milieu naturel met en évidence le caractère potentiellement toxique pour le milieu aquatique de métaux (chrome, plomb, cuivre et zinc), et de substances organiques telles que les nonylphénols, les organoétains, les polychlorobiphényles (PC) et les HAP. Les concentrations en métaux, HAP et micropolluants organiques des milieux aquatiques sont augmentées significativement par les rejets d'eaux pluviales. A l'échelle événementielle, les rejets pluviaux sont des contributeurs significatifs et parfois majeurs des rejets urbains par rapport aux rejets des stations d'épuration, notamment pour des polluants émergents tels que les alkylphénols, le bisphénol A ou certains résidus phytosanitaires ou pharmaceutiques (lors de la surcharge des stations d'épuration sur réseau unitaire). Annuellement, dans le cas des alkylphénols et du bisphénol A, un bilan en l'Ile-de-France suggère que les eaux pluviales pourraient contribuer à entre 20 et 60 % des flux de polluants en Seine. La variabilité est liée aux événements pluvieux.

Les rejets d'eaux pluviales ont des impacts importants sur les écosystèmes aquatiques. Pour un certain nombre de substances (pesticides, certains métaux), ils entraînent des phénomènes de bioaccumulation et de bioamplification le long des chaînes trophiques, qui peuvent affecter certains organismes (maladies, longévité plus faible, reproduction perturbée), ou conduire à terme à la disparition de certaines espèces et donc perturber l'écosystème. Les nombreux micropolluants organiques étudiés plus récemment dans les eaux pluviales ont, quant à eux, des conséquences sur les milieux aquatiques encore très mal documentées.

Enfin, les rejets d'eaux pluviales et plus encore les RUTP ont des impacts sanitaires notables. Les concentrations élevées en germes de contamination fécale, bactéries et virus, issues des déjections animales sur les espaces publics et des eaux de réseau unitaire by-passées peuvent conduire à la fermeture temporaire de zones de baignades ou d'activités nautiques.

3.2.2. Les dispositifs alternatifs de gestion des eaux pluviales

En opposition à l'évacuation rapide des eaux pluviales qui a longtemps dominé l'assainissement pluvial, de nouvelles approches se développent depuis une vingtaine d'années. L'objectif est de faire en sorte que l'urbanisation perturbe aussi peu que possible le cycle de l'eau, et notamment de réduire autant que possible le ruissellement de l'eau en surface. Ce sont, en France, les "techniques alternatives" (sous-entendu au réseau d'assainissement pluvial) ou encore les "solutions compensatoires" (sous-entendu des effets de l'urbanisation). Elles évoluent vers des dispositifs intégrés au projet urbain, contribuant à re-perméabiliser la ville et à redonner une place à la nature en ville. La gestion à la source des eaux pluviales correspond ainsi à une nouvelle vision de l'eau comme ressource et constitue l'un des principaux leviers pour la maîtrise des impacts hydrologiques de l'artificialisation des sols.

3.2.2.1. Les différents dispositifs

Les ouvrages centralisés, alimentés par des réseaux de conduite, sont des bassins de rétention, souterrains en centre-ville et à ciel ouvert en zone péri-urbaine. Ces dispositifs reposent pour la plupart sur la décantation des eaux.

Les techniques de gestion à la source reposent sur le stockage et l'infiltration des eaux pluviales, captées au plus près de la source, pour réduire les flux de ruissellement mais aussi les flux de polluants associés. Différents dispositifs se développent (Figure 3-3) : les noues (fossés peu profonds et larges, végétalisés), les toitures végétalisées, les "jardins de pluie" (dépression plantée créée pour récupérer l'excès de ruissellement d'un bâtiment et de son environnement), les chaussées réservoirs (structures poreuses à forte capacité de rétention d'eau), les tranchées infiltrantes (le long des parkings ou des trottoirs), les biofiltres (filtres plantés), etc.



Figure 3-3. Gestion à la source des eaux pluviales (adaptée de Bayerisches Landesamt für Umwelt)

3.2.2.2. Les performances hydrologiques des dispositifs de gestion à la source

A l'échelle locale, les performances hydrologiques des différents dispositifs ont fait l'objet de nombreux travaux, souvent consacrés à l'observation de leur fonctionnement. La plupart des ouvrages ont pour objectif de limiter les débits de pointe afin de maîtriser les surcharges des réseaux d'assainissement et les risques d'inondation. Ils sont donc conçus pour se prémunir des événements exceptionnels, mais aussi parfois pour réduire les volumes écoulés lors de pluies courantes ou importantes. Les performances sont évaluées sur la réduction ou le retard du débit de pointe, la réduction des volumes, ou la capacité de rétention. L'efficacité des dispositifs fait l'objet d'un consensus, même si une grande variabilité des performances est observée. Le maintien dans le temps de ces performances dépend de la capacité d'infiltration de la couche de sol sous-jacente, et beaucoup de l'entretien des ouvrages.

A une échelle plus globale (bassin versant, rivière urbaine, nappe), ces dispositifs jouent *a priori* un rôle bénéfique, mais leur présence à l'échelle urbaine doit être assez systématique pour que cet impact soit significatif, ce qui n'est pas encore le cas dans la réalité. Ils sont susceptibles d'influer sur trois composantes du cycle urbain de l'eau : la recharge de la nappe, le débit de base des cours d'eau urbains, et de façon moindre l'évapotranspiration. Peu d'études montrent l'impact réel de la généralisation de techniques sur la quantité d'eau souterraine et le débit de base. Si une infiltration diffuse des eaux pluviales dans les espaces verts est susceptible de favoriser l'évapotranspiration, il semble que des dispositifs de type "jardins de pluie" modifient peu cette composante.

Les limites de ces dispositifs et les freins à leur développement sont souvent liés au risque de dysfonctionnement hydrologique sur le moyen ou le long terme. Les deux problèmes évoqués sont : le piégeage des sédiments, dont la gestion et le traitement sont peu appréhendés en amont, et le colmatage qui réduit les capacités d'infiltration. Les connaissances ont toutefois progressé et des recommandations permettent de réduire le risque de colmatage ; la végétation peut y contribuer. Les risques géotechniques ou géologiques (proximité des bâtiments, nature du sous-sol) sont parfois mis en avant vis-à-vis des pratiques d'infiltration, mais peu d'études sont consacrées à ces sujets.

3.2.2.3. Les performances environnementales des différents dispositifs

Les dispositifs de gestion des eaux pluviales permettant de lutter contre l'impact polluant des eaux pluviales urbaines dépendent de leur niveau d'insertion (amont ou aval) dans le système de gestion des eaux.

Les ouvrages centralisés en aval permettent un abattement efficace des contaminants particuliers et une réduction de la biodisponibilité des métaux (par interaction avec les sédiments). Le recours à des ouvrages centralisés extensifs de filtration (filtres plantés) commence à se développer en France. Mais le traitement des sédiments pollués qui s'accumulent dans ces ouvrages constitue une vraie préoccupation pour les collectivités. Pour les ouvrages d'infiltration centralisés, des études confirment le rôle du sol en matière de piégeage des principaux polluants véhiculés par les eaux pluviales (métaux lourds, hydrocarbures...) et présents sous forme plutôt particulaire. Se pose cependant la question des polluants présents sous forme dissoute, comme les pesticides, qui sont détectés en aval de systèmes d'infiltration centralisés.

Les dispositifs de gestion à la source permettent une gestion différenciée des eaux de ruissellement, adaptée à leur potentiel de contamination. Ils contribuent par différentes voies à la maîtrise des flux de polluants. La réduction du flux de polluants est favorisée par le fait que les effets de lessivage et d'entraînement des particules sont plus faibles sur les surfaces amont (débit plus faible). Les revêtements de surface perméables montrent une capacité d'abattement des concentrations des matières en suspension, et limitent les apports de HAP. Les surfaces perméables végétalisées permettent un prétraitement du ruissellement superficiel par décantation et filtration au travers des végétaux. L'infiltration des pluies courantes dans des ouvrages de rétention perméables et végétalisés réduit de façon considérable le flux polluant annuel : ces ouvrages (bio rétention, jardins de pluie) assurent la filtration physique de polluants particuliers à travers le substrat filtrant et la sorption de polluants dissous, et ils sont généralement efficaces pour retenir les MES et les polluants particuliers (métaux, HAP). La potentialité d'un transfert de polluants dans le proche sous-sol des ouvrages d'infiltration ne doit cependant pas être écartée.

3.2.2.4. La plurifonctionnalité des dispositifs de gestion et l'évolution de la gouvernance des eaux pluviales

Ces dispositifs de gestion à la source font partie des aménagements urbains courants, et les concepteurs leur assignent plusieurs fonctions : réintroduction de la nature ou d'objets de nature en ville, insertion dans les trames vertes et bleues, structuration de l'espace et verdissement des quartiers, espaces de stationnement... Les bassins en eau, mais aussi les ouvrages perméables et végétalisés (en favorisant un stockage de l'eau dans les couches superficielles la rendant mobilisable pour l'évaporation qui rafraîchit l'air) pourraient également contribuer à limiter l'îlot de chaleur urbain. Enfin, la végétation associée à ces dispositifs participe *a priori* à la conservation ou au développement de la biodiversité en ville.

Ces évolutions techniques marquent le passage du réseau technique d'assainissement à un système de gestion des eaux urbaines tel qu'entendu par le Code général des collectivités territoriales, qui inclut des dispositifs techniques mais participe aussi à l'aménagement urbain et à la qualité de vie. Les services et acteurs impliqués (concepteurs, gestionnaires, usagers...) dans le fonctionnement de ce système sont plus nombreux. La multifonctionnalité des ouvrages et le jeu multi-acteurs nécessitent des approches nouvelles et entraînent une évolution de la gouvernance des eaux pluviales (Encadré 3-3).

3.2.3. Limites des études actuelles et identification des besoins de recherche

3.2.3.1 Limites des études actuelles et identification des besoins de recherche

L'hydrologie urbaine est définie par ses acteurs comme la science du cycle de l'eau en milieu urbanisé pris sous les angles physiques, physico-chimiques et biologiques. Elle inclut l'étude des interactions entre le cycle de l'eau et les activités humaines dans ce milieu. Elle s'est développée sur ces enjeux, en associant toujours étroitement recherche, ingénierie et pratiques opérationnelles, ce qui constitue une richesse et une originalité. Les priorités de recherche ont accompagné ou anticipé les besoins : évacuation des eaux de temps de pluie, protection contre les inondations urbaines, développement de techniques alternatives de gestion des eaux pluviales, protection des milieux aquatiques. La participation de l'eau et de la végétation au cadre de vie, à la limitation de l'îlot de chaleur urbain, la gestion intégrée des eaux urbaines dessinent de nouvelles préoccupations qui renforcent le rôle structurant du cycle de l'eau dans le projet urbain,

L'observation pour la recherche. L'observation *in situ* et sur le long terme représente en hydrologie urbaine, comme dans toutes les sciences de l'environnement, un fondement de la recherche, une base des collaborations entre équipes et une des clés du succès des projets interdisciplinaires. La structuration des observatoires en hydrologie urbaine a été engagée avec la création du Système d'Observation et d'Expérimentation pour la Recherche en Environnement URBIS. Il est important de poursuivre et de renforcer cette initiative (ex. SNO, SOERE) qui doit naturellement intégrer une observation des pratiques et de la gouvernance.

La modélisation hydrologique intégrée. La gestion à la source, le rôle de l'infiltration et de la végétation illustrent l'implication de tous les processus hydrologiques dans la gestion des eaux pluviales. Il existe un réel besoin de développer les

connaissances sur les processus hydrologiques qui étaient jusqu'à présent peu étudiés dans un milieu avec ses propres spécificités : hétérogénéité spatiale du sol et du sous-sol, diversité du mode d'occupation des sols. Il s'agit notamment des écoulements de l'eau dans le sol et le proche sous-sol, de l'interface sol-atmosphère... Il sera ainsi possible de développer une nouvelle génération de modèles à différentes échelles, dispositif local, bassin versant et agglomération urbaine, répondant aux besoins suivants : i) conception et le dimensionnement des dispositifs de gestion à la source, ii) modélisation intégrée des bassins versants urbanisés et péri-urbains, iii) la modélisation couplée des transferts d'eau, de polluants, et d'énergie en milieu urbanisé.

Le renforcement des approches de recherche interdisciplinaires sur le cycle urbain de l'eau. L'ensemble des fonctions des systèmes de gestion des eaux urbaines ne peuvent être étudiées que dans le cadre de projets interdisciplinaires regroupant différents volets : hydrologique, fonctionnement et évolution de la ville, actions anthropiques et qui associent différentes communautés scientifiques dont celles des sciences de l'univers et de l'environnement, des sciences de l'ingénieur, et des sciences humaines et sociales. Cette interdisciplinarité permet également d'étudier le rôle des acteurs qui interviennent dans la conception, l'entretien voire la réhabilitation avec l'objectif de créer de nouveaux référentiels et d'aider les collectivités à revoir leurs schémas organisationnels.

Encadré 3-3 - Acteurs, gouvernance et gestion

Les dispositifs de contrôle à la source des eaux pluviales concourent à la gestion des eaux pluviales et sont une composante à part entière des projets urbains. Cette évolution des pratiques pose de nouvelles questions en termes de politiques locales, d'acteurs, de territoires, de gouvernance et de gestion des services publics.

Politiques publiques : une affirmation partielle de différents enjeux

Les eaux pluviales ont obtenu en 1992 une reconnaissance comme objet de politique publique par le législateur qui décide alors de réguler les "eaux pluviales et de ruissellement" par des systèmes unitaires et séparatifs.

L'analyse des politiques locales dans ce domaine souligne la présence d'un foisonnement des acteurs et territoires. Il faut attendre le récent arrêté du 21 juillet 2015 sur la gestion des flux d'eau en temps de pluie en système unitaire qui incite à une plus forte coopération des services d'assainissement collectif et de gestion des eaux pluviales urbaines (confiée aux communes depuis la réforme de l'organisation territoriale en 2014). Comme la compétence "assainissement" revient de façon obligatoire aux intercommunalités en 2020, des clarifications viendront et un partage des conditions d'exercice et de transfert de compétences (inventaire patrimonial, évaluation des charges, gestion des eaux pluviales...) dans un futur proche.

Pour des politiques territoriales de gestion des eaux pluviales, la préférence semble nettement aller à l'instrument réglementaire pour intégrer le plus en amont possible les eaux pluviales dans l'aménagement. Les prescriptions établies par les collectivités entraînent une adaptation des projets urbains. Les collectivités s'assurent du respect de leurs prescriptions.

Les questions posées par le changement climatique restent peu abordées par les gestionnaires et sont encore des préoccupations de la recherche. La question des polluants est également peu présente dans les politiques locales du fait entre autres de son caractère diffus.

Quels systèmes, quels patrimoines, à quels coûts pour quels services ?

Le passage de la solution "tout tuyau" à la gestion à la source introduit la notion de **système de gestion des eaux urbaines (SGEU)** qui regroupe les différentes infrastructures (linéaires et surfaciques), le(s) bassin(s) versant(s) naturel(s) ou urbain(s), l'organisation, c'est-à-dire le(s) service(s) gestionnaire(s), mais également l'environnement naturel et humain. Le SGEU marque l'évolution du réseau technique d'assainissement vers un système incluant des dispositifs techniques, mais participant aussi à l'aménagement urbain et à la qualité de vie. Cette gestion à la source des eaux pluviales s'étend pour assurer de fait des services écosystémiques en milieu urbain. La multifonctionnalité des ouvrages et le jeu multi-acteurs nécessitent des approches nouvelles.

La **gestion patrimoniale** passe par une phase d'inventaire et de caractérisation des différents dispositifs (incluant notamment des dispositifs végétalisés), qui pose la question de l'accès aux données et de la définition d'une typologie commune. Se rajoute un nouveau champ d'investigation qui est celui des externalités positives liées à l'aspect esthétique, paysager, récréatif.

La gestion patrimoniale s'appuie, d'une part, sur la maintenance de l'équipement durant son cycle de vie et, d'autre part, sur sa réhabilitation ou son renouvellement. Le recul est encore insuffisant pour prédire l'évolution dans le temps de l'état de ces dispositifs. On s'interroge aussi sur le financement (budget général, budget annexe de l'assainissement, propriétaire privé...) et la durée d'amortissement, mais aussi sur le ou les responsables de l'entretien et/ou de la réhabilitation des dispositifs.

3.2.4. Conclusion

L'hydrologie urbaine qualitative a montré depuis de nombreuses années l'influence forte de l'imperméabilisation des sols et de la présence des réseaux et ouvrages souterrains sur le cycle de l'eau à échelle locale et globale en milieu urbanisé. Les sols artificialisés, hors sols scellés, de par les phénomènes de compaction ou les hétérogénéités spatiales fortes de texture ou structure peuvent aussi avoir, à échelle locale, un impact sur l'accès à l'eau pour la végétation. Les sols revêtus favorisent de plus la dégradation de la qualité des eaux de ruissellement urbaines par le transfert de polluants émis par les activités humaines (transport, chauffage, émissions industrielles...) et déposés sur les surfaces.

Les leviers d'action proposés s'appuient sur la législation de 1992 sur la régulation des "eaux pluviales et de ruissellement" par des systèmes unitaires et séparatifs et visent au développement d'ouvrages centralisés et de dispositifs de gestion à la source. Ils font partie des aménagements urbains courants multifonctionnels : réintroduction de la nature en ville, insertion

dans les trames vertes et bleues, structuration de l'espace et verdissement des quartiers, espaces de stationnement, conservation ou développement *a priori* de la biodiversité... Les bassins en eau, mais aussi les ouvrages perméables et végétalisés pourraient également contribuer à limiter l'îlot de chaleur urbain. La gestion intégrée des eaux urbaines renforce le rôle structurant du cycle de l'eau dans le projet urbain et dessine de nouvelles perspectives avec des besoins accrus en termes d'observations et de modèles intégrés. La gestion patrimoniale des ouvrages et dispositifs est d'autre part un champ d'investigation nouveau pour la recherche qui s'appuie sur l'étude du rôle des acteurs qui interviennent dans la conception, l'entretien voire la réhabilitation avec l'objectif d'aider les collectivités à revoir leurs schémas organisationnels.

3.3. Impacts de l'artificialisation des sols sur l'environnement physique urbain

On s'intéressera ici aux conséquences de l'artificialisation des sols sur le microclimat urbain et sur l'environnement acoustique, ainsi sur la qualité de l'air, qui dépendent cependant surtout d'effets indirects de l'artificialisation.

L'étude des impacts sur le climat global serait pertinente, mais elle est très complexe et dépasse largement le cadre de cette ESCo : elle devrait inclure une vision complète des impacts de l'ensemble des activités locales sur les changements climatiques mais aussi les rétroactions de ces changements climatiques sur le local, et avec beaucoup d'autres impacts (pollution de l'air, économie...). Elle nécessiterait également de développer des approches sur le métabolisme urbain¹⁵ et sa place dans les bilans carbone (émissions de GES créées et évitées, séquestration...).

L'impact de l'artificialisation sur l'environnement physique peut être direct, dû aux modifications des surfaces qu'elle entraîne, et indirect par les usages qu'elle permet ou induit. Les processus impliqués et leurs impacts sont étudiés d'une part à l'échelle des surfaces élémentaires, et d'autre part, depuis l'échelle des bâtiments ou de la rue jusqu'à l'échelle de la ville (quartier, ville, agglomération). Les modifications de l'état des surfaces et les processus d'étalement et de densification seront traités en termes d'impact sur le confort thermique et acoustique au sein des villes.

Encadré 3-4 - L'approche « Sky view factor » de l'artificialisation des sols

Le « facteur de vue du ciel » est une approche très utilisée par les chercheurs qui travaillent sur le piégeage radiatif des villes. Il rend compte de l'effet de la forme urbaine sur l'effet d'îlot de chaleur urbain. Ce facteur se définit comme la proportion de la voûte céleste (hémisphère) vue par l'observateur, donc non occultée par un élément physique. Ce paramètre permet essentiellement de mesurer l'ouverture du tissu urbain vers le ciel. Cette approche est basée sur une vision 3D de la ville. Cette vision 3D est également pleinement prise en compte dans les calculs de la surface développée qui intègrent la dimension verticale de la ville et consistent à ajouter aux surfaces horizontales toutes les surfaces verticales des bâtiments, l'enjeu étant de pouvoir calculer les échanges thermiques (Tableau 3-1).

Quartier	Emprise au sol (surface de bâti / surface au sol du quartier)	Densité de façade (surface de façade / surface développée du quartier)	Densité de surfaces de bâtiment (surface d'enveloppe bâtie / surface développée du quartier)
Douve (habitat individuel dispersé)	18,5	19,1	34,1
Baugerie (habitat collectif peu dense)	18	25,2	38,7
La Télindière (habitat individuel en bandes)	21,8	31,7	46,6
Graslin (centre-ville ancien)	62	57	83,7

Tableau 3-1. Proportion des différentes surfaces dans la surface développée pour plusieurs quartiers de Nantes

3.3.1. Les impacts sur le microclimat urbain

Les villes sont caractérisées par un microclimat spécifique du fait de la nature des surfaces urbaines (majoritairement minérale), de la forme de la ville et des activités anthropiques (émissions de chaleur...). La spécificité du microclimat urbain s'exprime principalement par le phénomène d'îlot de chaleur urbain (températures plus élevées en ville que dans les zones rurales voisines). Outre son impact négatif sur le confort en milieu urbain, le phénomène d'ICU pose des questions sanitaires avec parfois des conséquences dramatiques, comme lors de la canicule de l'été 2003 qui a entraîné un surcroît de mortalité estimé à 70 000 décès en Europe, dont 20 000 en France.

¹⁵ Le métabolisme urbain peut être défini comme l'ensemble des transformations et des flux de matière et d'énergie intervenant dans le cycle de vie d'une zone urbaine (Bochet et Cunha, 2003).

Les recherches en microclimatologie des dernières années ont porté sur l'influence de la densification des villes et de l'artificialisation des sols sur le microclimat urbain, et sur les moyens d'en atténuer les effets, particulièrement les solutions basées sur la végétation, mais aussi les possibilités offertes par les matériaux et les formes urbaines. La littérature analysée mobilise essentiellement des approches de "modélisation des processus" ; certains travaux font référence à des programmes de mesures des paramètres décrivant le microclimat, mais ils restent insuffisamment nombreux.

Encadré 3-5 - Le corpus bibliographique et son analyse

Le corpus analysé comporte 524 références dont 52 ouvrages et 392 articles de revues internationales. L'origine géographique des études est très variable et comprend des applications en Asie, en Europe, sur les continents américains et en moindre quantité sur le continent africain.

D'une manière générale, les études actuelles portent sur trois échelles :

- celle de la ville, à laquelle est étudié l'îlot de chaleur urbain, sa formation avec la densification et l'étalement des villes, et sa relation avec les caractéristiques spatiales de la ville ;
- celle du quartier, retenue pour analyser le confort thermique en fonction des formes urbaines et des aménagements ;
- celle, très locale, des surfaces, à laquelle est évaluée l'efficacité des dispositifs de rafraîchissement.

3.3.1.1. Principes d'étude des climats urbains

• Les échelles de description du microclimat urbain

La troposphère peut être décrite comme un ensemble de couches d'atmosphère, dont seule la Couche Limite Atmosphérique (CLA) appelée couche limite urbaine (CLU) au-dessus des villes – 500 m à 2 km d'épaisseur –, va subir l'influence humaine. Cette dernière se décompose en : une couche de mélange et une couche de surface qui comprend la canopée urbaine correspondant aux éléments urbains rugueux, depuis le sol jusqu'au niveau moyen des toits.

• Les phénomènes physiques déterminants du microclimat urbain

Le climat urbain résulte des échanges d'énergie (radiative, thermique) et des échanges hydriques entre les surfaces et l'atmosphère, et des interactions aérodynamiques entre la canopée et l'atmosphère qui s'effectuent à des échelles de temps et d'espace très variées au sein de la CLU.

Le bilan hydrique (Figure 3-4.A) traduit les échanges d'eau entre le sol et ses réseaux enterrés, les surfaces et l'atmosphère en période de temps de pluie ou en temps sec, et prend en compte la variabilité spatiale des caractéristiques de la surface du sol (imperméabilisation, présence de végétation), des propriétés hydrodynamiques des sols (perméabilité) et de la présence de réseaux enterrés qui constituent des lieux de drainage préférentiels dans le sol. Au flux d'évapotranspiration entre surface et atmosphère, correspond un flux de chaleur, le flux de chaleur latente (cf. 3.2).

Le bilan énergétique (Figure 3-4.B) exprime l'équilibre entre le rayonnement net, le flux de chaleur latente (issu du bilan hydrique), le flux de chaleur sensible (convection au niveau des surfaces) et le flux de chaleur stockée par conduction dans les sols et au travers de l'enveloppe des bâtiments.

Les interactions aérodynamiques entre canopée et atmosphère résultent des phénomènes aérauliques, c'est-à-dire des processus permettant de décrire les écoulements de l'air (Figure 3-4.C).

La nature et les propriétés des sols interviennent donc :

- par la perméabilité, dans le bilan hydrique : sur le ruissellement ou l'infiltration de l'eau, son stockage dans le sol, l'évaporation et l'évapo-transpiration ;
- par les caractéristiques optiques (albédo, transmissivité, émissivité) et thermiques (conductivité, capacité calorifique et masse volumique), dans le bilan thermique : via l'absorption ou la réflexion des rayonnements ;
- par la rugosité, dans les phénomènes aérauliques mais aussi par l'écart de température air/surface, effet indirect du bilan thermique.

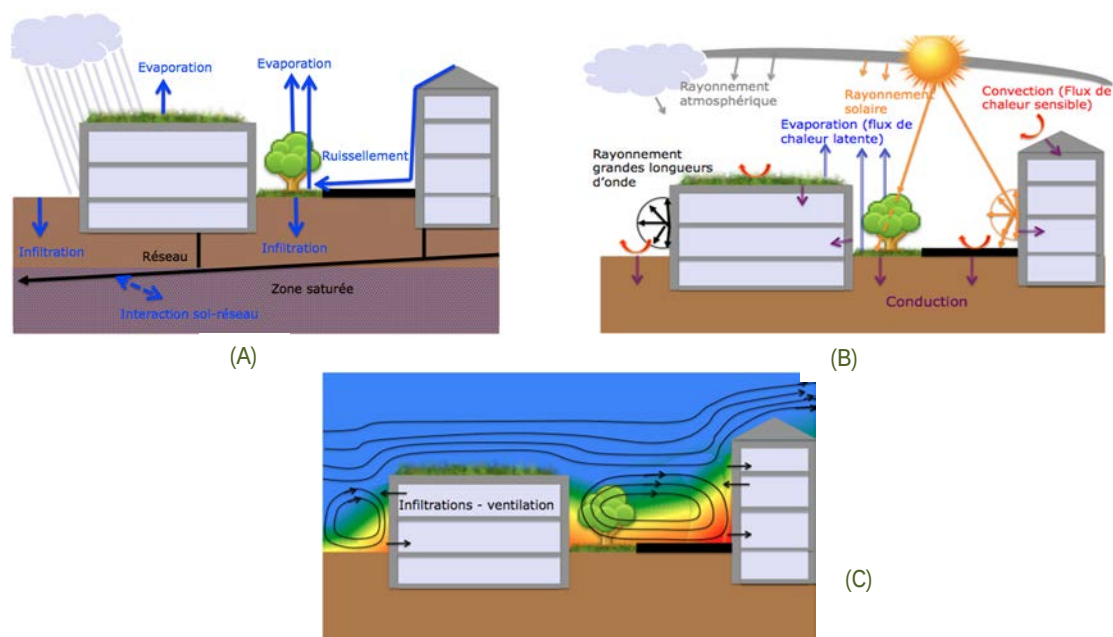


Figure 3-4. Bilan hydrique (A), bilan thermo-radiatif (B), et processus aérauliques (C)

3.3.1.2. La mesure de l'îlot de chaleur urbain et sa modélisation

L'évaluation des différences spatiales de température au sein d'une zone urbaine est réalisée par la mesure et par la modélisation. On accède ainsi à des données sur les îlots de chaleur à la surface du sol et atmosphériques.

- Méthodes de mesure de l'ICU et analyse des données

La mesure des températures de surface en milieu urbain s'effectue majoritairement par télédétection. Pour caractériser l'ICU atmosphérique, on utilise des mesures *in situ*, qui sont réalisées généralement à l'aide de capteurs placés dans la couche de canopée urbaine (Figure 3-4.c) qui enregistrent la température de l'air, l'hygrométrie, la vitesse et la direction du vent, et des flux de chaleur.

L'analyse des données acquises par la mesure peut se faire avec des modèles empiriques de régression géoclimatique, qui visent à établir une relation statistique entre la température et une ou quelques variables explicatives identifiées en considérant les phénomènes en jeu (population, forme urbaine, usage des sols,...), ou avec des méthodes de classification géoclimatique, qui visent à identifier des zones climatiquement homogènes en fonction de la densité bâtie et de la hauteur des bâtiments ou de la nature des surfaces pour les zones non bâties, ou encore en utilisant des méthodes d'interpolation géostatistiques. Les cartes thermiques de la ville ainsi obtenues permettent d'étudier la relation entre l'évolution de l'amplitude de l'ICU et le développement de l'urbanisation par analyse de séries historiques de données.

- Les approches de modélisation climatique de l'ICU

La dernière décennie a connu d'importantes avancées dans le développement des modèles climatiques basés sur la représentation spatiale de la ville et sur la simulation des échanges énergétiques et hydriques entre le milieu urbain et l'atmosphère pour décrire le phénomène d'ICU. Les modèles climatiques urbains peuvent être classés en deux familles, selon l'échelle d'appréhension : le fragment urbain (de la rue au quartier) ou la ville.

Les modèles à l'échelle du fragment urbain (approches "ambiances thermiques") visent à étudier les hétérogénéités des facteurs physiques d'ambiance contribuant au confort de l'utilisateur de la ville. À l'échelle de l'environnement proche (rue, place...), ils représentent explicitement (géométrie, positionnement) les différents éléments du milieu urbain (bâtiments, sols, arbres...), et simulent leur impact local sur l'ensoleillement, le vent, la température et l'humidité de l'air. L'élément de base de la modélisation est souvent le "canyon urbain", délimité par la rue et les bâtiments qui la bordent.

Dans les modèles à l'échelle de la ville, les différents éléments constituant le milieu urbain ne peuvent plus être représentés explicitement. Ces modèles utilisent donc les spécificités suivantes du milieu urbain ayant une influence sur le vent, la température et l'humidité de l'air : la morphologie urbaine, la présence de surfaces imperméables, la part relative des surfaces bâties et naturelles, les propriétés physiques des surfaces (albédo, émissivité) et des matériaux (conductivité et capacité thermiques). L'influence de la végétation, le stockage de chaleur et le piégeage radiatif dans les rues peuvent être pris en compte de façons très variées dans les modèles.

• Les principaux résultats

De nombreuses études confirment que l'urbanisation modifie les flux d'énergie en surface et s'accompagne ainsi d'une augmentation de la température de l'air et d'une diminution de son humidité, quel que soit le contexte climatique, conduisant au phénomène d'ICU par contraste avec la température de l'air des zones moins urbanisées. La structuration spatiale de l'ICU est en lien avec celle de la morphologie de la ville. Sa magnitude et son empreinte au sol varient en fonction de la saison. Ainsi en milieu tempéré, la zone dépassant la magnitude de 2°C (seuil à partir duquel on estime avoir une signature de l'urbanisation) est beaucoup plus étendue en saison froide qu'en saison chaude. En revanche, l'intensité maximale de l'ICU semble moins dépendante de la saison.

Les études s'accordent à montrer que les quartiers les plus verts connaissent des températures de surface plus faibles que les quartiers plus minéralisés. A Marseille, cette approche a permis d'identifier 8 types de quartiers urbains, caractérisés chacun par une température moyenne et un écart-type reflétant l'hétérogénéité et la combinaison des surfaces caractéristiques du quartier. Une étude réalisée à une échelle plus fine, à Tel-Aviv, a distingué les comportements thermiques des différents éléments urbains : pendant la journée, les éléments qui participent le plus à l'échauffement de l'air sont les toits, les rues et les sols pavés exposés au soleil, et les rues couvertes d'asphalte et les toitures atteignent les températures les plus élevées ; ce sont les murs extérieurs et les arbres qui ont les températures nocturnes les plus élevées ; les espaces ouverts, exposés à l'ensoleillement direct en journée et aux échanges avec le ciel la nuit, présentent les écarts de température journaliers les plus grands. La contribution à l'ICU est croissante pour les sols suivants : pelouse, sol nu, pavés, béton, asphalte.

Pour étudier l'impact de l'urbanisation d'une ville sur la température de l'air, il faut différencier l'accroissement de température lié à l'urbanisation de celui dû au réchauffement global. On peut ainsi comparer la différence de température observée ou simulée à celle globalement identifiée en lien avec le changement climatique, ou faire des modélisations en combinant des scénarios de changement climatique avec ou sans évolution urbaine. Une étude prospective (Agüeso, 2014) montre ainsi que l'augmentation de température nocturne liée à l'urbanisation pourrait être deux fois plus grande que celle liée au changement climatique à échéance de 2050. En revanche, l'urbanisation ne semble avoir que peu d'impact sur les températures maximales.

3.3.1.3. Les solutions d'atténuation des impacts de l'urbanisation

Les solutions proposées dans la littérature visent à intervenir sur la nature et les propriétés des différentes surfaces : horizontales (sols, surfaces des infrastructures et des bâtiments), verticales (façades), et en pente (toitures). Les toits influent beaucoup sur les consommations énergétiques des bâtiments, et ils sont dorénavant regardés comme des surfaces supplémentaires (utilisables pour installer des panneaux solaires, des jardins...) ont été les plus étudiés.

• Les solutions grises (portant sur les matériaux de construction)

La recherche de l'augmentation de l'albédo des surfaces est très étudiée. Un tel effet réfléchissant est obtenu par des revêtements de couleur claire, mais aussi non rugueux, utilisés pour les sols, les toits ou les façades. Les **toitures réfléchissantes** maintiennent ainsi la température de surface à une valeur basse (Tableau 3-2), et réduisent l'énergie transmise vers le bâtiment et également vers l'air de la canopée urbaine. Les **façades réfléchissantes** apparaissent très intéressantes pour assurer le confort d'été dans les bâtiments. Toutefois, elles présentent l'inconvénient de renvoyer les flux solaires qui ne sont pas absorbés vers les surfaces environnantes (source de désagrément).

Pour les sols, les revêtements clairs sont particulièrement intéressants par rapport aux revêtements de chaussée conventionnels qui absorbent l'énergie solaire. L'autre option explorée est la recherche de sols évaporatifs, qui s'échauffent moins grâce à la consommation d'une partie de l'énergie solaire par l'évaporation d'eau. La première solution consiste à arroser les chaussées (imperméables) en période chaude. La seconde consiste à retenir l'eau de pluie et de ruissellement dans un revêtement poreux. Un état de l'art récent (2015) sur les "revêtements frais" conclut que leur influence réelle sur la température de l'air n'est pas bien connue ; leur impact sur le comportement thermique des bâtiments adjacents et sur le confort des piétons est peu abordé. Leur validation reste donc nécessaire. Les revêtements de surface ont aussi fait l'objet ces dernières années d'innovations technologiques visant à leur donner une multifonctionnalité. Les revêtements de sol photovoltaïques, par exemple, en plus de produire de l'électricité qui peut être utilisée pour l'éclairage, permettent de réduire la température de surface, par rapport à des chaussées conventionnelles ; un premier tronçon expérimental a été installé sur une route de l'Orne.

	Principe	Options techniques	Baisse de température de surface	Baisse de température de l'air à proximité	Autres fonctions	Inconvénients, limites
Sols solaires	absorbe et valorise le rayonnement solaire	revêtement de sol photovoltaïque	Moyenne (5-10°C)	Faible (<1°C)	production d'électricité (pour l'éclairage)	Stade expérimental
Revêtements de sol frais	réduit l'absorption du rayonnement solaire	sol blanc	Très élevée (>15°C)	Elevée (>1°C)		éblouissement
		gris, vert, bleu	Moyenne (5-10°C)	Faible (<1°C)		
Sols évaporatifs	rafraichit par évaporation	avec arrosage	Très élevée (>15°C)	Elevée (>1°C)		consommation d'eau
		asphalte poreux retenant les pluies	Moyenne (5-10°C)	Faible (<1°C)	gestion de l'eau de pluie	peu de retour d'expérience (Japon)
Sols nus et végétalisés	rafraichit par évaporation, évapotranspiration et ombrage		Très élevée (>15°C)	Elevée (>1°C)	Récréation, fourrage Gestion de l'eau de pluie	Entretien
	Isolant, montée en température faible		Elevée (10°C, <15°C)	Faible (<1°C)	Gestion de l'eau de pluie	
Toitures végétales	rafraichit par évapotranspiration	Différents types de plantes	Dépend de la végétation et de l'épaisseur du substrat	Faible (effet limité à la proximité du toit)	rafraichissement intérieur du dernier étage	Entretien
Toitures réfléchives ("cool roofs")	réduit l'absorption du rayonnement solaire	Grand nombre de types de revêtements	Très élevée (>15°C)	Elevé (effet limité à la proximité du toit)	rafraichissement intérieur important du dernier étage	consommation d'énergie en hiver Entretien (clair)
Façades végétalisées	rafraichit par évapotranspiration et/ou ombrage			quelques degrés en climat chaud et sec	Intérêt acoustique, confort intérieur en été	consommation d'eau pour les murs végétaux avec substrat
Façades à fort albédo	réduit l'absorption du rayonnement solaire		Effet comparatif aux façades conventionnelles très variable			Rayonnement, éblouissement, consommation d'énergie en hiver

Tableau 3-2. Principales solutions techniques à l'échelle locale visant à atténuer l'îlot de chaleur urbain

A l'échelle du fragment urbain, seules les solutions reposant sur l'utilisation de matériaux à forte réflectivité solaire ont été étudiées. La plupart des résultats proviennent de simulations ; les autres sont issus d'observations qui ont été réalisées sur des surfaces de petite taille, et très peu dans le cadre de l'évaluation d'un projet réel. Ces études montrent l'effet de rafraîchissement diurne et nocturne généré par l'augmentation de l'albédo des matériaux en ville ; l'intensité du rafraîchissement (souvent de l'ordre du degré Celsius seulement) dépend fortement du type de surface modifiée (sol, façade, toit), de l'orientation et de la morphologie des rues, et du climat. Dans des régions où l'ensoleillement est important, la modification de l'albédo des toitures est plus intéressante que leur végétalisation.

En matière de matériaux réfléchifs, les travaux actuels portent sur l'optimisation de la répartition des caractéristiques optiques des matériaux dans les rues, nécessaire pour éviter des conditions aiguës d'inconfort. Par ailleurs, en climat tempéré, l'utilisation de ces surfaces risque d'augmenter les consommations d'énergie des bâtiments en hiver.

• Les solutions vertes (portant sur la végétalisation urbaine)

Les solutions vertes ont été de loin les plus étudiées, du moins à l'échelle des surfaces. La végétalisation peut concerner les sols, les toitures et les façades. Sur sol naturel nu ou végétalisé (pelouse, arbres), les températures de surface seront moins élevées que sur les sols artificiels, en raison du caractère isolant des matériaux naturels, de l'ombrage (pour les surfaces arborées) et de l'évaporation/évapotranspiration favorisée par la rétention d'eau. L'amélioration du confort en été sera nette en journée sous les arbres ; en revanche, les surfaces enherbées ouvertes génèrent de la fraîcheur pendant la nuit mais ont un impact faible en journée.

Les toitures végétalisées présentent des effets avérés de rafraîchissement intérieur et de limitation du réchauffement des températures extérieures à proximité du toit. L'effet thermique au niveau du sol reste faible ; il varie selon les caractéristiques de la toiture végétale (substrat, densité de feuillage...) et du bâtiment (hauteur, isolation, etc.), et selon le type de climat. L'intérêt de la végétalisation des toits est ainsi décroissant pour les climats : chaud et sec, chaud et humide et tempéré. Les toitures vertes peuvent également améliorer d'autres fonctions écosystémiques, comme la biodiversité et la qualité de l'air.

Lorsque les façades végétalisées sont ensoleillées, elles absorbent l'énergie solaire (et la retransmettent peu) et montent faiblement en température. Elles permettent d'améliorer le confort en journée. Les effets sur la température d'air dans les rues dépendent du climat, de l'effet de confinement (rapport de forme de la rue) et de la disponibilité en eau. Des façades végétalisées permettent de maintenir l'air frais dans des rues où l'effet de confinement est important (rapport hauteur/largeur élevé).

La conclusion majeure est que les sites très végétalisés restent plus frais que les zones fortement bâties. Les espaces verts créent localement des zones de confort diurne et nocturne, mais ils peuvent aussi contribuer au rafraîchissement des quartiers situés à proximité (Figure 3-7), en fonction des vents dominants et de la morphologie du quartier (rues plus ou moins ouvertes sur le parc).

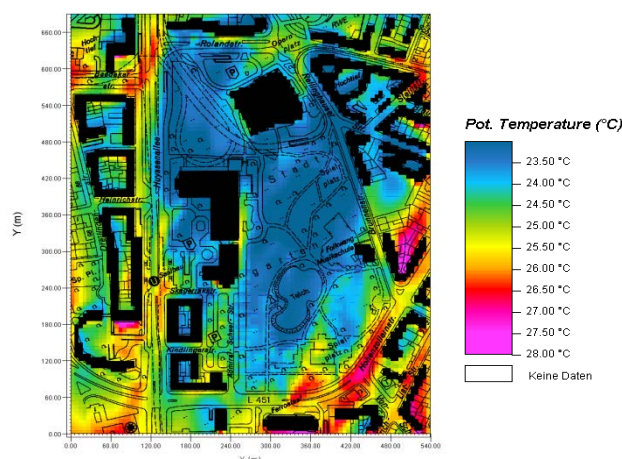


Figure 3-7. Température d'air (°C) dans et autour d'un parc urbain à Essen (Allemagne) ; carte obtenue avec le modèle ENVI-met (Lahme et Bruse, 2003)

• Les solutions bleues (portant sur l'eau)

Selon leur taille, les étendues d'eau stagnante peuvent avoir un impact positif ou négatif sur l'ICU. Si l'effet est globalement positif pour des surfaces d'eau importantes, certaines surfaces de faible taille stockent de la chaleur et deviennent suffisamment chaudes pour réchauffer l'air pendant la nuit.

Les rivières semblent refroidir l'air toute la journée. Certaines études concluent à un effet quasi nul alors que d'autres concluent à un effet important, il est donc très probable que la relation entre effet des cours d'eau et morphologie urbaine, peu investiguée, soit un déterminant majeur de l'effet climatique des cours d'eau sur les quartiers environnants, ainsi que l'aménagement des berges.

A noter aussi le développement de toitures bassins (toitures bleues) qui stockent l'eau de pluie pour désengorger les réseaux. Leur effet sur l'ICU a peu été étudié, mais on peut penser qu'il sera similaire à celui des surfaces arrosées, et inférieur à celui des toitures végétales qui développent une surface d'évaporation supérieure. Par ailleurs, elles posent des problèmes sanitaires et d'entretien liés à la stagnation de l'eau. La solution proposée est de les recouvrir d'un matériau poreux.

• Les solutions jouant sur la forme urbaine

En zones climatiques arides, les bâtiments hauts et des rues majoritairement orientées nord-sud permettent de minimiser le nombre d'heures d'inconfort thermique ; et structurer la ville en blocs constitués de cours intérieures est préférable à des structures de type "rue canyon" ou "grands ensembles". Ces conclusions, acquises dans des contextes urbains particuliers, ne peuvent toutefois être généralisées car l'intérêt d'une forme urbaine n'est pas indépendant d'autres caractéristiques telles que les matériaux utilisés et les types de sols. Une végétation arborée pourrait par exemple contribuer à améliorer les conditions de confort dans une rue ouverte vers le ciel (création d'ombrage) mais diminuer le confort dans une rue faiblement ouverte (réduction de la vitesse du vent). Une approche plus globale de l'aménagement urbain est nécessaire.

3.3.1.4. Lacunes actuelles et perspectives

• L'amélioration des modèles pour l'évaluation des techniques de réduction de l'ICU

L'objectif d'évaluer les techniques alternatives d'aménagement urbain visant à réduire l'ICU requiert souvent une meilleure prise en compte, dans les modèles, des phénomènes en jeu. Les modèles ont déjà beaucoup évolué pour s'adapter aux nouvelles hypothèses d'aménagement urbain. Des points restent à améliorer.

Concernant les sols, une comparaison internationale récente de 33 modèles, a montré que la prise en compte de la végétation et des surfaces naturelles, présentes même en faible pourcentage, améliore le résultat global du modèle, mais aussi que les flux de chaleur latente associés sont les composantes du bilan les moins bien modélisés. Ce peut être dû à la méconnaissance de la teneur en eau du sol, ainsi qu'à l'utilisation de modèles de végétation conçus pour les milieux ruraux. Alors que la végétalisation des surfaces et des pratiques nouvelles de gestion des eaux pluviales sont envisagées pour réguler le climat urbain, un travail coordonné avec les hydrologues du milieu urbain est nécessaire pour mieux représenter, dans les modèles climatiques, les interactions entre la végétation, la surface, le sol et le sous-sol.

Concernant les interactions climat-bâtiments, les recherches démarrent et explorent l'impact de l'utilisation des systèmes de conditionnement d'air, des matériaux du bâtiment (passifs ou actifs). Cependant, la grande diversité des situations (climat, morphologie urbaine et type de bâtiment) rend l'analyse difficile. Explorer une plus grande gamme de solutions nécessite la

prise en compte des interactions bâtiment/climat urbain, et donc la mise au point d'outils permettant de représenter à la fois la physique du bâtiment et du microclimat.

Concernant la forme urbaine (orientation, densité, hauteurs...), les études existantes montrent l'intérêt de travailler sur ce déterminant, mais aussi que chaque site nécessite une étude particulière en raison de conditions spécifiques (conditions climatiques régionales, topographie, présence de cours d'eau, taille/densité/disposition des espaces végétalisés...).

- La modélisation à l'échelle de la ville

Très peu de travaux de recherche traitent des méthodes de diagnostic nécessaires pour élaborer des stratégies urbaines visant à mieux rafraîchir la ville. La difficulté est qu'il n'existe pas de solution universelle, et que les effets des solutions dépendent beaucoup de la forme urbaine. De même, les politiques d'urbanisme ne sont pas évaluées en termes d'impact climatique. Il faudrait pour cela pouvoir projeter formellement ces politiques (ce qui nécessite de définir l'évolution du bâti à l'échelle de la parcelle), puis les évaluer sur un large territoire avec des outils qui ne sont pas en mesure de décrire finement la morphologie urbaine. Ainsi, piégeage solaire et ventilation de la ville sont peu traités, en relation avec la forme urbaine, les matériaux et la nature des sols.

3.3.2. Artificialisation des sols et pollution de l'air

Il n'existe pas à notre connaissance de travaux scientifiques mettant en relation l'artificialisation des sols (ou l'urbanisation) et ses effets sur et par la pollution de l'air. De nombreux travaux analysent les émissions et concentrations de polluants et leurs évolutions dans les villes, ou montrent l'impact du développement des grandes agglomérations sur la pollution, en s'appuyant sur l'observation ou la modélisation ; quelques rares études comparent différentes formes urbaines. Mais ces travaux ne considèrent que quelques polluants et certains des mécanismes de pollution, et développent des analyses sur une région, un épisode de pollution, etc., et il est difficile d'en tirer des conclusions générales.

Encadré - Le corpus bibliographique

Le corpus scientifique relatif à la pollution atmosphérique est très large, avec une abondante littérature très spécialisée sur la modélisation, l'observation, l'analyse, et les effets de la pollution de l'air, mais aussi des lacunes et inégalités de connaissances, selon les polluants, les processus, les secteurs d'activités, les effets... Le corpus analysé comporte une trentaine de références. Parmi celles-ci, 6 mettent en œuvre des chaînes de modélisation physico-chimiques (jamais complètes de l'activité aux effets sur les populations) et considèrent la pollution particulaire ou l'ozone, sur des études de cas avec quelques scénarios de développement urbain. Quatre autres références portent sur la simulation du trafic et des émissions. Trois études de la pollution particulaire sont basées sur l'analyse d'observations (satellitaires, ou au sol). Ces différents travaux concernent surtout des territoires aux USA, en Chine, en Europe.

3.3.2.1. Origine et variabilité de la pollution atmosphérique

- Mécanismes de pollution de l'air

Les processus régissant la pollution de l'air sont multiples et complexes (Figure 3-8) : émissions locales biogéniques et anthropiques (différents secteurs d'activité, transports, énergie...) de centaines de composés polluants particuliers ou gazeux, apports de polluants en provenance des territoires voisins ou lointains ; interactions physicochimiques entre ces composés et apparition de composés secondaires ; processus thermiques, météorologiques et climatiques qui dispersent, transportent, transforment ces polluants ; résorption par dépôts secs ou humides... C'est pourquoi on ne peut pas mettre simplement en relation l'artificialisation (changement d'occupation du sol et urbanisation) avec ses effets sur la qualité de l'air.

Les effets de la pollution de l'air sont eux-mêmes nombreux : ils affectent, directement ou indirectement, les populations humaines et animales, la flore, les milieux, le cadre de vie et le bâti... Il n'existe pas à ce jour de synthèse des impacts de la pollution de l'air. Aux effets directs de la pollution atmosphérique s'ajoutent des impacts indirects et de long terme par transfert des polluants dans les eaux, les sols et la chaîne alimentaire. Les effets sur la santé humaine sont multiples, difficiles à caractériser car ils résultent d'expositions à des concentrations de polluants relativement faibles mais de longue durée, et difficilement dissociables car ces polluants interviennent en mélange dans la pollution atmosphérique ambiante (qui comprend aussi la pollution intérieure des bâtiments). Les effets sur la faune, la flore, les bâtiments et le patrimoine culturel sont peu documentés dans la bibliographie analysée, et sans doute considérés comme de moindre importance par rapport aux effets sanitaires sur les populations.

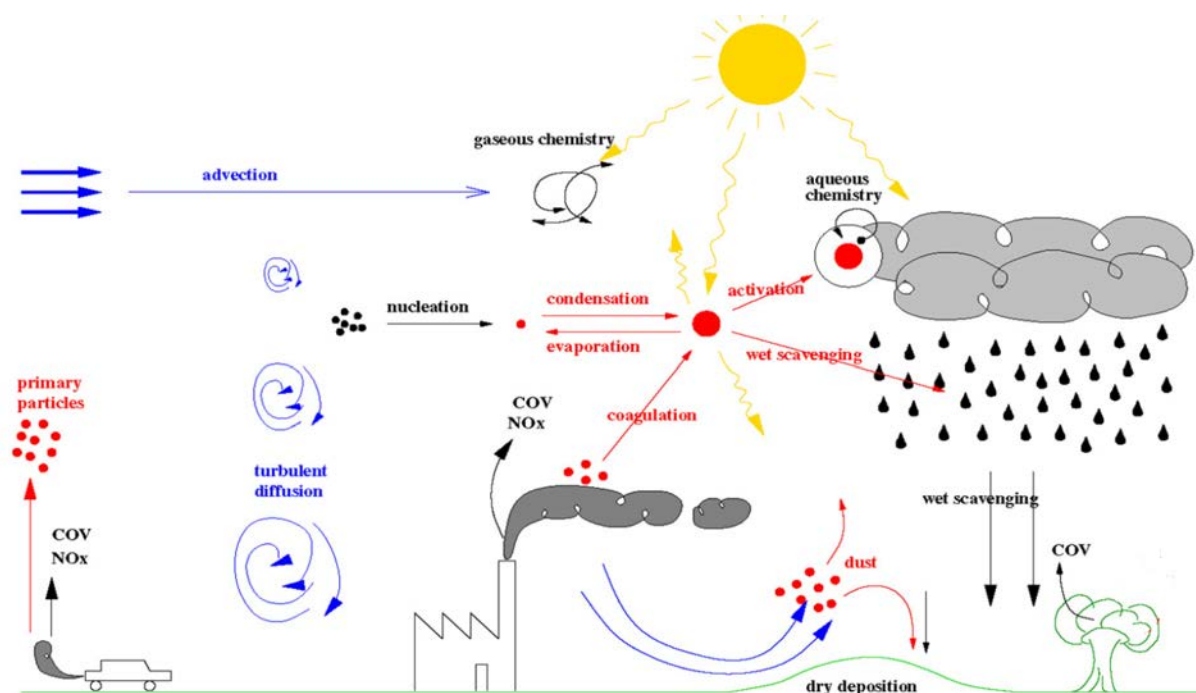


Figure 3-8. Vue schématique des processus de la pollution atmosphérique (Sartelet, 2017)

• Variabilité spatiale et paramètres de la pollution de l'air

La pollution atmosphérique affecte particulièrement les grandes agglomérations, où les enjeux sont importants, en raison de fortes émissions (trafic, chauffage), de phénomènes d'inversion de températures qui peuvent empêcher la dispersion des polluants et d'îlots de chaleur qui aggravent la pollution et probablement ses effets, et du grand nombre de personnes exposées. La pollution varie cependant avec le contexte géographique (topographie, altitude, climat) et météorologique (vitesses et directions des vents, précipitations, températures), la nature des sources d'émissions (industries, trafic, chauffage, etc.) et des sources naturelles (forêts, déserts, océans). Localement, les concentrations varient fortement avec l'éloignement aux sources, l'étage du bâtiment, les configurations des rues ou des bâtiments.

Les processus de la pollution interviennent à différentes échelles. De manière simplifiée, on distingue la pollution de proximité, proche des sources (jusqu'à quelques dizaines à centaines de mètres et quelques dizaines de minutes) et qui affecte donc les riverains et usagers des axes routiers, et la pollution de fond qui peut s'étaler sur plusieurs dizaines à centaines de kilomètres, sur plusieurs heures ou journées, et qui concerne des agglomérations entières et au-delà.

• Évolutions de la pollution de l'air

En France, les émissions anthropiques de polluants diminuent, par la mise en œuvre de réglementations, de technologies de dépollution (catalyseurs, filtre à particules...), mais ces diminutions concernent principalement les polluants réglementés tandis que d'autres polluants (non contrôlés, ou liés à de nouvelles technologies ou carburants) peuvent persister ou émerger. Les concentrations de polluants baissent également, mais moins rapidement (-20% en 15 ans pour NO_2 et PM_{10}), tandis que la pollution par l'ozone est plutôt en progression.

Cette évolution favorable des émissions et concentrations de polluants n'est pas vérifiée partout dans le monde, et les régions qui connaissent un fort développement voient leurs émissions de polluants croître considérablement, malgré des progrès rapides dans la mise en œuvre des réglementations et technologies plus propres. Ainsi, à échelle mondiale, les émissions anthropiques de NO_x et de PM_{10} croissent encore à un rythme de 1 à 3% par an.

3.3.2.2. Urbanisation et qualité/pollution de l'air

Plusieurs travaux ont tenté d'appréhender l'incidence de l'urbanisation sur la qualité de l'air, au travers d'observations au sol et/ou satellitaires de la pollution et de l'occupation des sols, ou par la simulation des mobilités et émissions de polluants induites, les plus exhaustives simulant l'ensemble de la chaîne, de l'occupation des sols aux concentrations de polluants et à l'exposition des personnes. Différents scénarios, de développement urbain ou de redéploiement des populations et activités, sont envisagés ; les simulations portent sur des épisodes de pollution (quelques journées) ou sur une année entière, et

concernent toujours une agglomération ou une région donnée (disponibilité de données locales). Ces travaux, enrichis d'études sur la végétalisation en ville et l'influence de l'urbanisation sur la météorologie, permettent de tirer quelques enseignements sur les conséquences de l'urbanisation.

- **Développement urbain et aggravation de la pollution de l'air**

La pollution est fortement dépendante du contexte, mais globalement, elle augmente avec l'urbanisation, par une croissance relative de l'activité en lien avec la population, par une augmentation des mobilités aggravée éventuellement par une extension géographique, et corrélativement par une hausse des émissions anthropiques et des concentrations de certains polluants sur les zones urbanisées et alentours. Enfin, l'urbanisation accroît le nombre de personnes exposées à ces concentrations, ce qui permet d'anticiper un impact négatif sur la santé des populations. Ces effets pourraient décroître avec l'avènement de technologies plus propres, des réglementations de limitation des émissions et de suivi des concentrations, mais sans présumer de l'émergence de nouvelles substances polluantes, de l'évolution des usages, d'une sensibilité accrue des populations, notamment avec le vieillissement et les changements climatiques.

- **Influence relative de l'occupation des sols par rapport à l'émission anthropique et l'exposition**

Les paramètres prépondérants de l'aggravation de la pollution sont l'augmentation des émissions anthropiques, du niveau des concentrations de la pollution de fond et du nombre de personnes exposées, l'extension urbaine et l'augmentation des mobilités. La modification de l'occupation des sols (urbanisation au détriment de forêts, de prairies, de sols nus ou de friches industrielles), la réduction éventuelle d'émissions naturelles (négligeables comparées aux émissions anthropiques), et l'évolution des conditions météorologiques locales liée à l'urbanisation sont des paramètres de moindre importance. Il en est de même de la configuration des quartiers, rues et bâtiments. L'urbanisation modifie les paramètres météorologiques locaux qui à leur tour influencent la pollution atmosphérique, dans des sens très variables, augmentation ou diminution selon les paramètres considérés.

Les travaux portant sur les matériaux, les écrans ou barrières et équipements susceptibles de tempérer ou influencer les effets de la pollution de l'air n'ont pas été analysés ici. Leur portée est très localisée et ne concerne que la pollution de proximité. Les matériaux absorbants n'ont probablement qu'un impact très limité en atmosphère ouverte.

- **Effets de l'extension et de la densification urbaine sur les émissions et l'exposition**

L'extension urbaine se traduit par une aggravation de la pollution de l'air au moins aussi importante que celle qui serait liée à la densification sans extension, et plus importante si l'on considère qu'elle accroît significativement les distances parcourues et la dépendance à l'automobile. La densification d'un centre urbain optimise la ville et l'accessibilité, mais aggrave l'exposition des personnes aux niveaux élevés de pollution. L'extension à faible densité (de type périurbain actuel, ou étalement urbain) aggrave globalement les effets (augmentation des concentrations de polluants PM10, ozone), avec cependant des zones de moindre pollution et une dilution de certains impacts (PM10) sur de plus grandes superficies. Une extension à plus forte densité ou une organisation multipolaire ou plus homogène de la ville, pourraient permettre d'optimiser l'organisation des déplacements, de contenir l'augmentation des émissions anthropiques et de limiter les populations exposées aux plus fortes concentrations. La végétalisation urbaine contribue globalement à diminuer la pollution de l'air, même si cet effet reste assez faible. Elle favorise également les modes de déplacement doux et actifs et améliore le cadre de vie. La morphologie urbaine et la configuration des quartiers peuvent également contribuer à réduire la pollution de l'air (diminution de la température, meilleure ventilation), même si le potentiel est probablement assez limité.

Enfin, les infrastructures de transports qui sont implicitement prises en compte dans les travaux analysés en milieu urbain, contribuent bien évidemment aussi à une pollution atmosphérique des zones non urbaines, mais les quantités d'émissions sont bien inférieures à celles enregistrées en zone urbaine, la résorption de la pollution est plus efficace, et la population concernée est réduite.

3.3.2.3. État des lieux des connaissances scientifiques, besoins de recherche et leviers d'action

L'explicitation de la problématique de l'influence de l'artificialisation sur la pollution de l'air et l'analyse bibliographique ont montré que de nombreux points, qu'il conviendrait de développer, sont peu ou pas documentés. On note ainsi : une littérature scientifique insuffisante (ou à mieux identifier) sur certains aspects de la pollution atmosphérique, un manque d'éléments de quantification ou d'ordres de grandeur qui permettraient de considérer les effets prédominants, le caractère souvent limité des travaux (quelques polluants, quelques mécanismes), et plus généralement un manque de travaux de synthèse qui permettraient une appréhension plus exhaustive de la pollution de l'air (de l'occupation des sols aux concentrations, à l'exposition et aux effets sur les populations), et de tirer parti des nombreuses expériences, simulations, études de cas, scénarios, et travaux visant à analyser les liens entre urbanisation, ses formes, et la pollution de l'air.

Il conviendrait également de développer des simulations sur des études de cas françaises (agglomérations à enjeu de pollution, contextes types) afin d'élargir les analyses et documenter les effets sous différents scénarios. Il s'agirait en particulier d'identifier et combiner les outils les plus appropriés pour permettre une analyse allant du développement urbain jusqu'aux impacts de la pollution de l'air, incluant l'analyse de l'exposition des personnes, voire l'extrapolation aux impacts sanitaires.

Les travaux analysés mentionnent peu de perspectives en termes de leviers d'action. Les conclusions des analyses permettent toutefois de retenir comme moyens susceptibles de réduire les pollutions de l'air ou leurs impacts :

- Une meilleure organisation spatiale de la ville, minimisant les besoins de mobilités, les distances et les émissions anthropiques sans toutefois conduire à des densités fortes de personnes exposées à des niveaux élevés de pollution (ville moins concentrée, moins étalée, plus homogène ou polycentrique),
- Des configurations favorables des bâtiments, quartiers, rues, etc., favorisant les écoulements d'air et la réduction de la pollution, et optimisant l'exposition des personnes, selon leurs activités, aux moindres niveaux de pollution,
- La végétalisation des villes, qui améliore en outre le cadre de vie et favorise la pratique des modes doux et actifs de déplacement,
- Le développement d'éco-quartiers et de modes de transports doux, actifs, collectifs, qui contribueraient à créer des zones de moindre pollution.

Même s'il est possible d'envisager la résorption des concentrations de polluants dans les villes, il est difficile d'apprécier la réversibilité des impacts (pour les générations futures). Il est également difficile de différencier l'effet marginal de l'effet global de l'artificialisation sur la pollution de l'air.

3.3.3. Les effets acoustiques de l'artificialisation des sols

Le bruit constitue aujourd'hui un problème sociétal majeur que soulignent les enquêtes d'opinion auprès des Français résidant en zones urbaines, qui placent le bruit en tête de leurs préoccupations avec la pollution de l'air et devant l'insécurité. L'impact du bruit sur la santé est avéré : atteinte aux facultés auditives, développement de problèmes cardio-vasculaires, de stress, d'insomnies... Afin de sensibiliser et lutter contre les nuisances sonores, la directive cadre européenne 2002/49/CE et la loi "Bruit" n°92-1444 du 31 décembre 1992 incitent à prévenir, réduire et limiter la pollution sonore.

L'artificialisation des sols se traduit à la fois par une modification des *sources* sonores en présence (liée à l'évolution des *usages*) et par une modification des conditions physiques de *propagation* du son. Ces dernières sont affectées par des effets *directs* de l'artificialisation des sols, sur la nature, les propriétés et la disposition des surfaces, et par des effets *indirects*, via les champs micro-météorologiques (effets de réfraction et de turbulence atmosphérique). Ces effets peuvent être observés à différentes échelles spatiales (la rue, le quartier, la ville, l'agglomération, le territoire).

Encadré - Le corpus bibliographique et son analyse

L'enjeu sociétal des nuisances sonores et l'étendue des travaux scientifiques sur cette thématique se traduisent par une grande richesse de la littérature scientifique, qui comporte des approches théoriques, statistiques, numériques (simulations) ou expérimentales. Le corpus analysé comprend 416 références. Il est composé principalement d'articles de revues scientifiques. Globalement, ces travaux émanent surtout d'équipes de recherche européennes (France, Allemagne, Italie, Angleterre, Pays-Bas, Belgique, etc.) et américaines (USA et Canada en particulier).

3.3.3.1. La "chaîne sonore"

L'analyse de l'"ambiance" sonore distingue plusieurs maillons dans la "chaîne sonore" : l'émission, la propagation, la réception et la perception (Figure 3-9).

Les sources de bruit urbain (émission) sont nombreuses et les zones artificialisées sont les lieux principaux de ces sources : infrastructures de transport, industries, activités professionnelles et commerciales, loisirs... En milieu rural, la pollution sonore est surtout liée au développement des infrastructures de transport et de l'industrie (énergie en particulier).

La propagation du son dans l'air est perturbée par le milieu et par les "frontières" que rencontre l'onde sonore, qui génèrent des phénomènes d'absorption du son, de réflexion (interférences), de diffusion (réflexions multiples), ou de réfraction (modification de la trajectoire de l'onde lors de la pénétration dans un milieu hétérogène). Les effets de frontières (réflexion, absorption, transmission) se produisent au contact d'obstacles "solides" (Figure 3-10) ; ils peuvent être complexifiés en présence de conditions micro-météorologiques particulières.

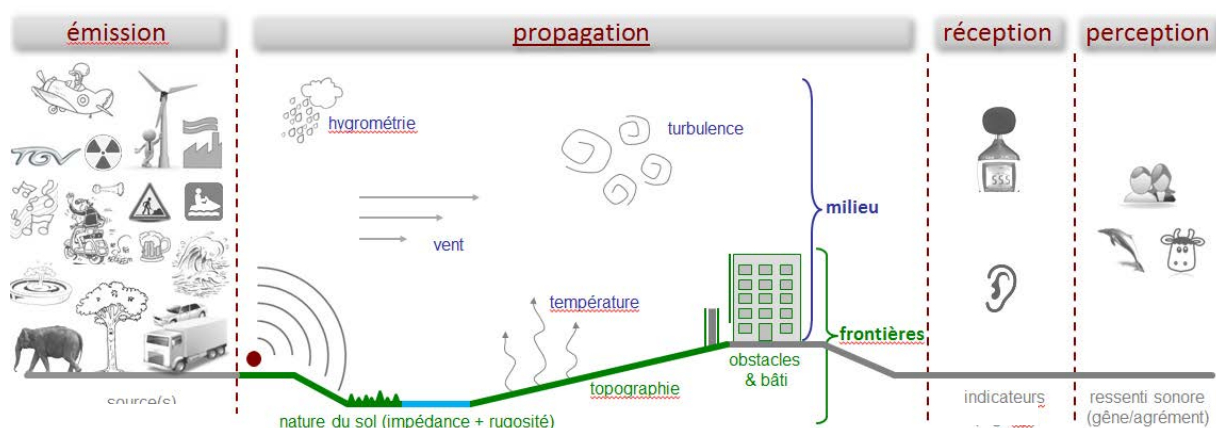


Figure 3-9. La "chaîne sonore", de l'émission à la réception et la perception, en passant par la propagation (Source : HDR B. Gauvreau)

Si la perception du bruit et ses effets concerne en premier lieu les populations humaines, les impacts sur la faune des villes sont également étudiés, par la bioacoustique. Des chercheurs néerlandais ont par exemple montré que les mésanges des villes, comparées à celles des champs, augmentent à la fois la puissance et la fréquence de leurs émissions sonores, afin de "couvrir le bruit des activités humaines". La pollution sonore provoquée par l'homme dans les zones protégées entraîne aussi des effets en cascade pour l'ensemble des écosystèmes.

3.3.3.2. Les effets directs sur la propagation sonore (effets de frontières)

L'artificialisation joue sur la propagation acoustique en modifiant la nature, et donc les propriétés, des surfaces naturelles ou artificielles, et en multipliant les obstacles.

• Propriétés d'absorption et rugosité des surfaces naturelles ou artificielles nues

La nature du sol va déterminer son caractère plus ou moins absorbant vis-à-vis des ondes sonores, qui dépend de paramètres tels que la porosité du matériau. Les sols "naturels" apparaissent souvent plus absorbants que les sols remaniés et surtout revêtus. On peut classer les surfaces en fonction de leurs propriétés acoustiques, dans l'ordre depuis les plus absorbantes : neige fraîche, sous-bois sec, prairies, terres labourées, jusqu'aux plus réfléchissantes : terre compactée, revêtement routier, eau, glace, béton lisse et peint.

La rugosité de surface a également un effet sur la propagation sonore, qui dépend du rapport entre la dimension des rugosités et celle de la longueur d'onde. Si l'irrégularité de la surface est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde, celle-ci subit une réflexion dans des directions multiples. Les rugosités de surface de grande taille (topographie) peuvent parfois agir comme des obstacles et ainsi masquer certaines sources sonores.

• Effets des surfaces construites

Aux phénomènes physiques liés au sol (dominants en milieu péri-urbain) s'ajoutent en milieu urbain (ou densément bâti) d'autres effets de frontières : influence de la morphologie urbaine, des obstacles, des bâtiments et de l'encombrement, et des propriétés de diffusion et d'absorption acoustique des revêtements, des toits et des façades... (Figure 3-10).

En milieu urbain, l'échelle d'observation est généralement le champ proche, mais la contribution des sources sonores "lointaines" (boulevard périphérique, par exemple) n'est pas toujours négligeable dans l'environnement sonore d'une rue ou d'un quartier.

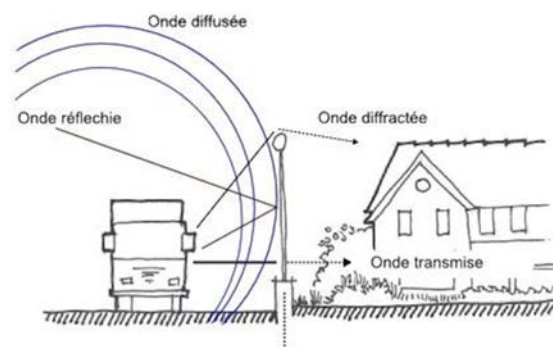


Figure 3-10. Propagation des ondes sonores en milieu urbain en fonction des obstacles rencontrés

• Effet de la végétation

Contrairement à ce qu'imaginent souvent les riverains (voire les urbanistes), un "rideau d'arbres d'alignement" ou une "ceinture végétale" ne constitue pas un moyen efficace de protection contre le bruit. Au-delà de son effet psycho-socio-acoustique, une telle infrastructure a des effets physiques limités pour les fréquences audibles : un rideau d'arbres absorbe très peu d'énergie

acoustique, et a surtout pour effet de diffuser ou diffracter le champ sonore (au même titre que le mobilier urbain) ce qui se traduit par une décroissance rapide des niveaux sonores. Les effets d'atténuation sonore d'un ensemble d'arbres vont surtout être liés aux propriétés d'absorption de son sol.

Les nouvelles pratiques de végétalisation de la ville, motivées notamment par des objectifs de régulation microclimatique, ont un effet sur la propagation sonore. Les simulations acoustiques de scénarios de végétalisation du bâti, comme dans le projet ANR VegDUD (2010-2013), ont permis de quantifier la grande disparité des propriétés d'absorption des différentes surfaces végétalisées, tant horizontales (toits) que verticales (façades).

Encadré 3-6 - Modélisation et cartographie du bruit

À l'échelle de la ville, la modélisation des phénomènes physiques liés à la propagation acoustique en milieu urbain à l'aide des modèles de référence (TLM, FDTD, PE, BEM...) reste délicate car très coûteuse en temps de calcul. C'est pourquoi il est d'usage de recourir à des modèles simplifiés (modèles d'ingénierie), plus souples à mettre en œuvre mais plus limités en termes de scénarios envisageables, d'indicateurs acoustiques et de précision des calculs. Ces modèles d'émission et de propagation acoustique (CNOSSOS-EU, NMPB2008...), parfois formalisés par des guides voire des normes, et intégrés dans différents outils logiciels, permettent aujourd'hui de mener de nombreuses études (études de cas diagnostiques, études d'impact prospectives).



Figure 3-11. Carte de bruit de la ville de Nantes, obtenue avec le modèle NMPB2008 et avec le logiciel open source "NoiseModelling"

3.3.3.3. Les effets indirects sur la propagation sonore (effets météorologiques)

Les principaux effets micrométéorologiques sur la propagation acoustique sont : la réfraction du son (courbure de l'onde sonore) selon les gradients verticaux de vitesse du vent et de température, et la diffusion par la turbulence atmosphérique.

Ces effets, thermiques et aérodynamiques, sur la propagation acoustique sont relativement bien connus en milieu dégagé ou "ouvert". En milieu densément bâti, leur description est plus récente, car les champs micro-météorologiques (de vent, température, hygrométrie...) y présentent souvent une structure particulièrement complexe, combinant gradients thermiques verticaux et horizontaux, et modifications des profils de vent par les obstacles. À l'échelle de la rue, l'encombrement dû à la présence de mobilier urbain, de voitures en stationnement ou d'arbres peut aussi sensiblement modifier les champs de vent ou de température, et par suite les champs de célérité du son. Les effets des gradients thermiques au voisinage des parois "classiques" (façades en pierre ou maçonneries, toits terrasses bétonnés...) peuvent être nettement limités en présence de végétal, ce qui modifie aussi les profils de célérité du son. À l'échelle de l'îlot urbain ou de la ville, les profils de vent et de température à l'intérieur et au-dessus de la canopée urbaine peuvent ainsi modifier la propagation acoustique.

Les conditions d'existence et l'intensité de ces phénomènes thermo-aéro-dynamiques dépendent essentiellement du proche environnement (la "rugosité urbaine"). Ces effets locaux liés à la réfraction et à la turbulence en milieu urbain (ou obstrué), difficiles à mesurer en pratique, ont été très étudiés essentiellement de manière numérique, par chaînage de modèles micrométéorologique et acoustique (les données de sortie du premier servant de données d'entrée du second).

3.3.3.4. Solutions de lutte contre le bruit

Il existe principalement deux manières de lutter contre les nuisances sonores : à l'émission du son (usages, sources en présence) et lors de sa propagation (barrières, obstacles, revêtements absorbants, façades et toits végétalisés, etc.). En milieu urbain ces solutions de lutte contre la propagation peuvent être combinées. D'autres solutions plus innovantes ont émergé ces dernières années, permettant éventuellement de faire face à des problématiques très précises (source sonore stable, continue et monochromatique), mais elles doivent encore être testées et validées in situ.

3.3.3.5. Lacunes actuelles et perspectives

La problématique de l'acoustique en milieu extérieur (émission et propagation) suscite beaucoup de travaux de recherche au niveau international. L'avènement des STIC (Sciences et technologies de l'information et de la communication) et en particulier des SIG (Système d'Information Géographique) a ouvert de nouvelles possibilités en acoustique environnementale, en termes de reconnaissance satellitaire, de qualification de la donnée, et de géolocalisation des sources sonores et des infrastructures. Les cartes de bruit rendues possibles par les SIG présentent un intérêt direct pour la quantification des superficies urbaines et des populations affectées par des niveaux de bruit. Malgré les progrès notables réalisés ces dernières années, de nombreux aspects ne sont pas encore maîtrisés, tant au niveau de la compréhension que de la caractérisation expérimentale et de la modélisation numérique des phénomènes physiques mis en jeu lors de l'émission et/ou la propagation acoustique.

- Les évolutions de la modélisation

Les modèles doivent sans cesse être adaptés pour prendre en compte les nouveaux matériaux et technologies : par exemple, les revêtements innovants ou les pneus de nouvelle génération et les véhicules électriques pour les sources sonores d'origine routière.

Le chaînage de modèles micrométéorologiques et acoustiques reste confronté à diverses difficultés : des échelles spatiales différentes selon les phénomènes physiques, et des coûts de calcul trop élevés pour permettre des simulations à l'échelle du quartier ou de la ville. Dans le cadre du projet ANR "Evaluation multidisciplinaire et requalification environnementale des quartiers" ("EUREQUA", 2012-2017) a été testé le principe d'un double chaînage numérique, faisant intervenir trois modèles successivement : i) les champs atmosphériques sont d'abord modélisés à l'échelle territoire/ville ; ii) ces champs sont ensuite utilisés comme données d'entrée aux frontières du domaine quartier/rues, puis iii) les informations des champs micrométéorologiques sont entrées dans le modèle de propagation acoustique à l'intérieur de la rue.

- Les évolutions des approches de la perception

Au-delà de la notion réductrice et négative de "bruit" (gêne sonore ou "nuisance"), ont émergé plus récemment les notions d'agrément sonore et d'ambiance sonore, qui s'intéressent davantage à la perception et au ressenti (individuel ou collectif). Elles intègrent les aspects physiologiques, psychologiques et sociologiques et donnent lieu au développement de nouveaux indicateurs acoustiques. Les relations de l'ouïe avec les autres capacités sensorielles sont également abordées, la perception auditive apparaissant très liée à l'environnement global (présence de sources de nuisances ou d'agrément diverses, sonores ou non) ; son étude nécessite donc souvent une approche holistique.

On assiste aussi au développement d'une **approche participative**, à laquelle le milieu urbain, densément peuplé, se prête bien, en particulier depuis le déploiement des smartphones. Ces dernières années ont vu exploser les initiatives en acoustique environnementale ; en France par exemple, une application pour smartphone (*NoiseCapture*) a été développée en parallèle d'un site web dédié à la cartographie sonore urbaine (*OnoMap*). Mais cet engouement général ne doit pas faire oublier les limites *métrologiques* et *méthodologiques* (incertitudes liées à l'ensemble de la chaîne de mesure, interpolations spatio-temporelles de données...) de telles approches.

3.3.4 Conclusion

Cette partie sur l'environnement physique urbain fait le point sur la relation entre l'artificialisation des sols, l'îlot de chaleur urbain (ICU), le bruit et la pollution de l'air, nuisances modifiant le confort thermique, acoustique et la qualité de l'air. L'analyse repose sur une vision 3D de la ville qui intègre sa dimension verticale. La surface développée de la ville (surface du bâti + surfaces imperméabilisées) à différentes échelles (bâtiment en lui-même, quartier, ville) et la végétation deviennent les interfaces d'étude des transferts énergétiques (radiatif, thermique) et hydriques entre l'atmosphère, le sol et l'intérieur des bâtiments. Les processus aérauliques décrivant les écoulements de l'air se surimposent aux échanges d'énergie et hydriques pour tendre vers une description intégrée des flux d'eau, d'énergie et de matière.

L'état de l'art met en évidence l'influence sur les différents processus des paramètres de morphologie urbaine, de nature des surfaces (matériaux, sols), de propriétés des surfaces (perméabilité, caractéristiques thermiques, caractéristiques optiques). De plus, tout accroissement de l'urbanisation (extension et densification) au travers de l'augmentation des activités, contribue à augmenter les émissions de chaleur, sonores et polluantes. Dans le contexte du réchauffement climatique, plusieurs études ont montré que l'urbanisation peut accentuer le phénomène d'augmentation de température de l'air, localement. En revanche, peu d'études ont été menées sur les effets conjoints du changement climatique et de l'urbanisation sur les autres paramètres tels que l'humidité de l'air et le vent. Certaines solutions proposées pour lutter contre l'ICU sont plutôt technologiques et jouent généralement sur les propriétés réfléchives des surfaces (solutions grises basées sur le développement de revêtements de surface mono- ou multifonctionnels). D'autres visent à se rapprocher des bilans énergétique et hydrique naturels en s'appuyant sur les systèmes hydriques et la végétation (solutions vertes, solutions bleues (cours d'eau, bassin), dont les effets positifs

dépendent de la taille de la masse d'eau et de la forme urbaine). Enfin les solutions jouant sur la forme urbaine pourront agir sur les nuisances thermiques, sonores et la pollution de l'air. Les interactions entre les différents dispositifs sont complexes et peuvent conduire à l'effet opposé de celui initialement souhaité, sans une vision globale de la situation incluant les différents paramètres entrant en jeu. Les solutions végétalisées sont de plus en plus prescrites et étudiées, mais la question de la disponibilité en eau est rarement abordée simultanément. De même les solutions doivent toujours être examinées au regard de la santé (pollution, allergies), de l'atténuation du changement climatique (émissions de CO₂) et des aspects économiques (solutions sans regret). Les perspectives de recherche vont dans le sens d'une intégration la plus poussée possible, par exemple par chaînage de modèles micrométéorologiques et acoustiques mais aussi pour développer des politiques d'urbanisme prenant en compte le phénomène d'ICU. L'acquisition de données à échelle locale et plus globale reste un challenge pour améliorer les cartographies (température, bruit, pollution de l'air) et valider les modèles.

4. Espace agricole, activité agricole et artificialisation des sols

L'artificialisation des sols est tout autant questionnée pour ses impacts environnementaux, dont nous venons de voir qu'ils dépendent pour une large partie de la façon dont celle-ci est pratiquée, que pour ses impacts sur l'activité agricole. L'impact de l'artificialisation sur la quantité de terres agricoles, sur la production agricole et sur les conditions d'exercice de l'activité agricole n'est pas toujours difficile à évaluer (4.1). Il l'est d'autant moins que les déterminants de l'artificialisation et/ou de la diminution des surfaces agricoles, qui peuvent être examinés au travers des composantes de la rente foncière agricole, sont multiples (4.2). La première difficulté revient à qualifier cet espace agricole, dans un contexte où les frontières qui différencient les territoires sont de plus en plus floues. Lorsqu'on se situe en zone périurbaine ou rurale, l'artificialisation du sol s'opère sur des espaces agricoles, forestiers ou semi-naturels, qui peuvent offrir comme principale résistance au phénomène d'étalement leur intérêt économique, soit direct et s'exprimant alors par les décisions du propriétaire, soit pour la collectivité (4.3). Cet intérêt collectif du sol est préservé par la régulation des usages qui peut pallier les défaillances du marché, notamment pour ce qui concerne le paysage, les espaces de loisirs, les services écosystémiques et la gestion des risques naturels. La régulation des usages peut s'effectuer au moyen de zonages ou de politiques agricoles (4.4).

4.1. Les impacts directs de l'artificialisation des sols sur la production agricole

4.1.1. Des pertes de terres agricoles auxquelles contribue l'artificialisation des sols

Les récentes évaluations françaises des changements d'affectation des sols attestent de la perte de terres agricoles, mouvement auquel contribue de façon non négligeable leur passage en sols artificialisés. Au-delà des bilans nets sur lesquels s'appuient la plupart des analyses, l'examen plus détaillé des échanges entre les différentes catégories d'affectation des sols et la prise en compte notamment des échanges entre sols agricoles et sols naturels et forestiers amènent à des conclusions un peu plus nuancées. Le schéma des flux 2006-2014 issu de Teruti-Lucas (Figure 4-1) met ainsi en évidence l'importance des pertes de terres agricoles vers des terres boisées et naturelles (respectivement – 287 000 ha et – 530 000 ha) qui dépassent largement les pertes agricoles par artificialisation (- 524 000 ha). Bien sûr, ces mouvements sont plus facilement compensés par des flux inverses en provenance de sols forestiers et naturels (respectivement, + 273 000 ha et + 317 000 ha) que depuis des sols artificialisés (+ 176 000 ha), la réversibilité des usages étant nettement plus aisée entre sols agricoles et sols boisés ou naturels qu'entre sols agricoles et sols artificialisés. Ainsi, la perte de terres agricoles qui se prolonge en France, combine à la fois un mécanisme de déprise-reprise agricole, probablement aux franges de ces espaces productifs, et un processus plus difficilement réversible d'artificialisation des sols.

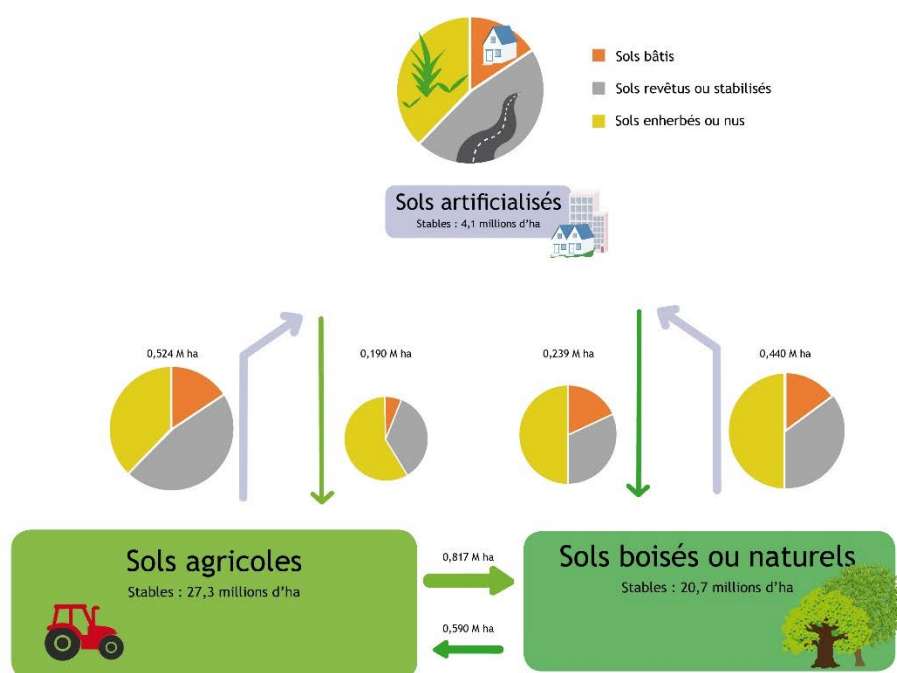


Figure 4-1. Changements d'affectation des sols selon leur usage en 2006 et 2014. Source : Teruti-Lucas, 2014, SSP, MAA. (graphisme : Elodie Carl)

Du point de vue des sols artificialisés, le mouvement d'artificialisation s'effectue un peu plus à partir des sols agricoles que de la somme des surfaces boisées (227 000 ha) et naturelles (213 000 ha), et le bilan net de deux tiers d'artificialisation au détriment des sols agricoles s'explique par les retours proportionnellement moins importants des sols artificialisés vers des sols agricoles (190 000 ha) que vers des sols boisés ou naturels (124 000 et 115 000 ha). Notons enfin que, parmi les 964 000 ha de terres qui ont changé d'affectation vers l'artificialisation au cours de la période 2006-2014, la moitié est restée enherbée ou nue et seuls 15 % ont été bâtis. À l'inverse, le retour vers des usages agricoles, forestiers ou naturels concernent à 65 % des sols artificialisés qui étaient enherbés ou nus et bien sûr très peu de sols bâtis (moins de 5 %). La part importante des surfaces artificialisées au cours de la période sans avoir été imperméabilisées ou stabilisées devraient amener à nuancer les impacts environnementaux négatifs de l'artificialisation.

Il est néanmoins clair que les pertes globales de surface agricole sont importantes mais que, pour en comprendre toute la dynamique, il y a lieu de s'interroger tout autant sur les processus qui conduisent à leur artificialisation qu'à ceux qui sont responsables de la déprise agricole et, à l'inverse, de la (re)mise en production agricole de surfaces boisées ou naturelles (ou peut-être laissées en friche). Ces deux derniers mouvements, à la marge du champ de l'expertise réalisée ici, touchent bien sûr des espaces aux caractéristiques agricoles et paysagères différentes de ceux concernés par le premier.

L'artificialisation des sols est aussi inégalement répartie. À l'échelle française, les changements d'affectation des sols vers leur artificialisation sont un phénomène qui se concentre aux proximités immédiates des villes et qui diffusent au sein des espaces périurbains. Ce faisant et parce qu'historiquement, les villes ont souvent été fondées là où il était possible de les alimenter sans coût de transport excessif, ce phénomène est susceptible de toucher plus particulièrement certains espaces agricoles de qualité dont on risque de manquer dans le cadre d'une agriculture de proximité, des espaces naturels de loisirs et/ou patrimoniaux pour les résidents urbains et des espaces naturels côtiers et/ou touristiques importants du point de vue de la biodiversité. La question ne se limite donc pas à des quantités de terres mais aussi à leur qualité, à leur productivité et aux services écosystémiques dont la société tirait antérieurement avantage. Chery *et al.* (2014) ont montré, en s'appuyant sur la classification pédologique des sols de France au 1/1 000 000^{ème}, et tout en soulignant les limites liées à la précision des données, que l'artificialisation affectait préférentiellement certains types de sols caractéristiques des terres à fort potentiel agricole (représentant environ 45 % de la superficie du territoire). Ils montrent aussi que quelques types de sols plus rares mais caractéristiques des zones humides sont également fortement affectés par l'artificialisation, alors que les sols caractéristiques des milieux forestiers sont les moins touchés.

Les terres agricoles apparaissent ainsi aisément convertibles et leur conversion vers l'artificialisation difficilement réversible. Le statut des terres agricoles est au centre des enjeux de préservation de cet espace sensible notamment au phénomène d'étalement urbain et illustre les tensions qui s'exercent autour de la régulation publique de l'occupation du sol.

4.1.2. Des pertes de terres à l'estimation des pertes de biomasse

L'estimation de l'impact que l'artificialisation des sols a sur les capacités de production agricoles ou sur les pertes de production de biomasse sur l'agriculture, nécessite tout d'abord que soit connue la qualité des sols agricoles en amont de leur artificialisation. La notion de qualité agronomique des sols agricoles ne fait pas l'objet d'un consensus au sein de la communauté scientifique, ce qui a amené les pédologues à privilégier l'identification d'un ensemble de caractéristiques biophysiques des sols plutôt que la construction d'un indicateur synthétique de qualité (agronomique et/ou environnementale). C'est une des raisons pour lesquelles les études qui visent à évaluer les pertes de capacité de production liées à l'artificialisation sont rares et comportent d'importantes limites. Il existe toutefois quelques travaux empiriques visant à produire des cartes d'indice de qualité et à les mettre en regard du phénomène d'artificialisation sous l'angle de la notion de perte de capacité productive. Leur intérêt est certain, mais ces travaux reposent sur de nombreuses hypothèses et approximations et leurs résultats sont à considérer avec prudence.

Ainsi, les estimations de production potentielle les plus fines se basent sur des modèles de culture, dont on sait qu'à moins de démultiplier le nombre de simulations, ils sont peu fiables à des échelles de vastes territoires (national ou international) dès lors qu'il y a de fortes variations locales des conditions pédoclimatiques et une forte hétérogénéité des types de production agricole et des pratiques culturales. Ces estimations sont, par ailleurs, limitées aux principales cultures pour lesquels des modèles de culture suffisamment fiables existent. La qualité des estimations de ces approches par modélisation est cependant en constante évolution.

En croisant un indice *Cropland Productivity Index*, issu des données du modèle SoilProd (Tóth *et al.*, 2011), avec les changements d'affectation des sols enregistrés via *Corine Land Cover* (CLC), Toth (2012) et Aksoy *et al.* (2017) montrent qu'en France, l'urbanisation se fait à 70 % au détriment des terres de très bonne qualité, sachant que, selon le classement retenu, cette catégorie de terres rassemble elle-même 68 % des sols de France. Ainsi, compte tenu de l'imprécision de ces estimations, le différentiel en défaveur de ces bonnes terres n'est pas significatif et l'artificialisation toucherait de manière équitable les sols de différentes qualités. Les pertes de capacité productive qu'ils estiment montrent qu'entre 2000 et 2006, celles-ci équivaldraient pour la France à 0,26 % de la production agricole totale, pertes qui se situeraient dans la moyenne européenne de 0,26 % de perte de capacité productive, avec un équivalent par habitant également dans la moyenne. Une

étude similaire à une échelle plus fine sur la région Languedoc-Roussillon utilisant un indice de qualité essentiellement basé sur la Réserve en eau Utile des sols, indique des pertes de sols par artificialisation proportionnellement plus importantes pour les sols ayant le potentiel agronomique le plus élevé, mais sans aller jusqu'à l'estimation chiffrée de la perte de capacité productive. En outre, ces niveaux estimés de pertes de capacité productive, somme toute assez faibles, semblent assez peu significatifs au regard de l'ensemble des autres facteurs de variation et d'incertitudes qui pèsent sur l'activité agricole et ses niveaux de production, compte tenu des combinaisons de production possibles et la façon dont l'agriculture et les marchés peuvent s'adapter à ce type d'évolution.

L'intensification des cultures sur les terres arables restantes peut compenser les pertes observées (Bren d'Amour *et al.*, 2017). Pour bien prendre en compte ce mécanisme, les approches à mettre en œuvre se devraient de coupler les résultats précédents avec des modèles économiques intégrant les réactions des marchés et l'arbitrage que les producteurs sont amenés à faire entre différentes productions. En France, sur les 30 dernières années pendant lesquelles le phénomène d'artificialisation des terres agricoles a été soutenu, les travaux prenant en compte cette dimension ne concluent pas à une chute significative des volumes de production imputable à l'urbanisation et aucune étude scientifique n'affiche de résultats statistiques en ce sens : les pertes de capacité productive dont il est question plus haut sont bien évidemment des pertes potentielles et doivent s'analyser en termes de perte d'option dans un contexte de ressources non renouvelables, ce que ne fait pas cette littérature.

Au final, le débat est vif entre, d'une part, ceux qui considèrent que l'artificialisation a un impact non négligeable sur les capacités productives de l'agriculture et que le cumul des pertes de terres sur le long terme peut mettre en péril cette activité et, d'autre part, ceux qui considèrent que cet impact, pris au niveau global, est souvent exagéré, notamment en Europe de l'ouest, et que nous sommes encore loin de la pénurie de terres agricoles. On ne peut en effet apprécier les impacts de l'artificialisation des sols en termes de pertes irréversibles de terres arables sans les mettre en regard du stock global de terres arables, utilisées ou pas, et ce, particulièrement dans un contexte de déprise agricole en zone rurale où les abandons sont réversibles.

Il n'en demeure pas moins que les impacts de l'artificialisation des sols sur l'agriculture sont ressentis très durement au niveau local, notamment dans les espaces périurbains où les agriculteurs sont directement confrontés à cette pression. Celle-ci engendre de fortes perturbations dans l'exercice de l'activité agricole et l'organisation locale de la production, du fait notamment de la fragmentation des territoires agricoles que la vague d'artificialisation des sols engendre, effet que nous détaillerons plus loin (4.3).

D'un point de vue économique, la qualité d'une terre se définit pour un usage donné et correspond à ce qu'il reste au propriétaire (qualité privée) ou à la société (qualité sociale) des bénéfices (privés ou sociaux) une fois que l'ensemble des autres facteurs de production ont été rémunérés, ce qui rend l'évaluation de cette qualité particulièrement complexe. Les fondements des politiques de préservation des terres agricoles fondées sur les indices de qualité des sols font l'objet de nombreuses réserves aux États-Unis comme en France (critique et abandon de l'utilisation de la "carte des terres agricoles" prévue dans la Loi d'orientation agricole de 1980).

4.2. La rente foncière agricole, vecteur des changements d'affectation des sols

Analyser les mécanismes par lequel une terre agricole peut subir un changement d'affectation dans le sens de son artificialisation, nécessite de recourir à un raisonnement en termes de différentiels de rente entre usages concurrents. Les modèles dynamiques de développement urbain s'intéressent aux facteurs expliquant la décision d'un propriétaire foncier de convertir une parcelle initialement à l'état agricole, forestier ou naturel en un terrain bâti. Le prix du foncier non bâti dans l'espace périurbain ou rural est égal à la capitalisation d'au moins trois composantes :

- La valeur de la terre agricole ou forestière
- Le coût de la conversion
- Les rentes futures attendues

Dans un contexte d'information parfaite, les propriétaires fonciers vont choisir le moment optimal de conversion de leur parcelle, de manière à maximiser leur bénéfice net attendu. En négligeant les valeurs d'option, la décision de construire a lieu dès lors que les rentes attendues pour un usage urbain sont supérieures à la rente agricole additionnée des coûts de conversion.

Tout en gardant à l'esprit le très fort différentiel à l'unité de surface entre le foncier bâti et le foncier agricole (55 fois supérieur pour le bâti, 1,72 €/m² contre 95,5 €/m², Encadré 4-1), il y a lieu de s'interroger sur la façon dont se construisent les rentes foncières agricoles et sur les éléments qui les composent de façon à voir comment elles évoluent à mesure de l'avancée du front d'urbanisation ou de la densification du périurbain. La valeur de la terre reste en effet un élément déterminant dans les décisions des acteurs privés de convertir leur terrain agricole en terrain à bâtir, bien qu'il ne soit pas le seul pris en compte. Des leviers existent ainsi pour influencer sur les décisions des acteurs publics et privés. La rente foncière agricole dépend de deux grandes catégories de facteurs : les facteurs internes à l'agriculture et les facteurs externes.

4.2.1. Facteurs internes à l'agriculture

La qualité d'usage des sols agricoles, bien que difficile à estimer, est prise en compte dans le calcul de la valeur de la terre. Cette qualité constitue un rempart solide contre l'artificialisation des terres agricoles et nécessite d'être préservée, bien que son poids varie fortement entre les régions et à l'intérieur des régions elles-mêmes. L'usage, le type d'agriculture pratiqué, etc. rendent la pratique plus ou moins dépendante des attributs biophysiques des terres (altitude, pente, qualité des sols).

Le climat fait également l'objet d'une attention particulière. En France, des travaux couplent l'influence du climat sur le prix de la terre agricole et les choix d'usage du sol dans une analyse en termes de scénarios d'évolution à l'horizon 2050. En prenant en compte l'extension de l'urbain (+1 million d'ha), il apparaît que les cultures annuelles et les forêts progresseraient (respectivement de +1 et +1,5 million d'ha) au détriment des prairies et des cultures pérennes (respectivement -2,5 et -0,3 millions d'ha). Les effets du climat ne sont par ailleurs pas limités aux cultures annuelles ou aux prairies, et l'on observe des effets sur les choix des éleveurs et sur les choix d'autres cultures pérennes.

En revanche, le recours aux intrants n'est généralement pas capitalisé dans le prix de la terre. A l'inverse, la disponibilité de l'eau (souterraine ou irriguée) augmente les revenus espérés de la terre agricole et donc son prix. Il en est de même pour les investissements réalisés pour "améliorer" l'exploitabilité de la terre, tels que l'agrandissement de la taille des parcelles, des forages, ou les travaux de drainage.

Encadré 4-1 - L'effet relatif des signes de qualité

Les signes de qualité valorisent l'activité agricole, mais de façon équivoque. Les indications géographiques peuvent avoir un impact fort sur le prix de la terre, parfois supérieur à celui des éléments biophysiques. Dans la région de Bordeaux, l'effet des appellations d'origine contrôlée n'est cependant pas significatif, ce qui peut être expliqué par une incapacité à répondre de manière suffisante à la pression urbaine, via une hausse significative des prix des terres.

Enfin, dans une perspective de limiter la déprise agricole, il est communément admis que la stabilité des soutiens à l'agriculture (PAC, Agriculture biologiques, etc.), joue sur la valeur du foncier et pérennise les activités agricoles. Les quotas et permis de production impactent également le prix de la terre agricole, que ce soit les droits d'épandage, ou les limites en termes de nitrates. Inversement, les effets d'aménité qui augmentent l'offre de bénéfices écologiques peuvent générer des revenus additionnels de la terre.

4.2.2. Facteurs externes à l'agriculture

Parmi les facteurs externes à l'agriculture susceptibles d'avoir un effet sur la valeur de la terre et donc sur les opportunités de conversion des espaces agricoles, la proximité des espaces déjà urbanisés, mais aussi des espaces naturels doit être prise en compte. Egalement, l'effet des SAFER et des collectivités territoriales mérite d'être étudié.

La proximité aux pôles urbains, tout comme celle des infrastructures routières, constitue à la fois une menace et une opportunité pour les activités agricoles. Elle peut être génératrice de nouveaux débouchés et conduire à une spécialisation de l'activité vers des produits à haute valeur ajoutée. Dans ce contexte, les programmes d'approvisionnement local des cantines scolaires (*farm to school program*) sont un levier non négligeable (Encadré 4-5). La ville ou la coexistence d'activités concurrentes dans un même espace peuvent être source de conflits d'usage et de gêne à l'activité agricole (fragmentation des espaces agricoles par les infrastructures de transport, restrictions sur certaines pratiques agricoles...). Parallèlement, la présence forte de populations non agricoles peut permettre le maintien de l'activité agricole en apportant un accès aux services et aux emplois. Mais, cette proximité peut aussi se traduire en termes de pression foncière et accentuer la vulnérabilité des terres agricoles si elles ne bénéficient pas d'une protection de type « Zone agricole protégée (ZAP) » ou « Protection des espaces agricoles et naturels périurbains (PEAN) » (cf. infra).

Encadré 4-2 - Le syndrome d'impermanence

La proximité à la ville peut avoir des effets négatifs sur l'agriculture par la diminution de l'horizon temporel sur lequel se fondent les décisions des agriculteurs. Ce syndrome d'impermanence implique que les agriculteurs sous-investissent dans leur activité, ce qui contribue à en diminuer la valeur potentielle. Sachant que le changement d'usage est rarement réversible et que sa perspective est associée à une hausse de la valeur de la terre, les conditions favorables à l'apparition d'une valeur d'option sont réunies. La valeur d'option s'ajoute à la valeur de l'activité agricole, elle provient de la possibilité d'attendre l'arrivée de nouvelles informations sur la valeur urbaine de la terre avant de faire le choix de conversion ou de vente.

Les espaces naturels à proximité des terres agricoles présentent des effets de débordement, positifs ou négatifs, mais généralement de moindre ampleur que les déterminants présentés ci-dessus. Les terres agricoles marginales vont être plus vulnérables face à l'abandon et à l'enfrichement, mais on peut considérer qu'une parcelle de terre agricole bénéficie des attributs des parcelles voisines par des effets d'externalité comme les espaces ouverts ou les services écosystémiques. Les paysages et les habitats naturels influent positivement sur la valeur des terres agricoles. Les services écosystémiques fournis

par les zones naturelles (lacs, rivières, forêts et zones de conservation) ont des effets positifs pour l'activité. Le développement du tourisme et des loisirs rendus possibles par les espaces naturels et forestiers, est aussi source de valeur pour l'agriculture, ce qui peut préserver les terres d'un changement d'usage.

En France, les mécanismes de protection de l'environnement peuvent diminuer localement la disponibilité de la terre, mais on n'observe pas d'effet direct sur l'activité agricole.

En revanche, le contexte institutionnel modifie sensiblement la valorisation de la ressource par l'agriculture. La sécurisation des droits de propriété et d'usage, tout comme le tracé du parcellaire joue un rôle sur le prix de la terre et sur la valorisation agricole. De manière intuitive, les coûts de transaction sont répercutés dans le prix de la terre, ce qui implique une plus grande rigidité du marché foncier, avec la non-réalisation de transactions potentiellement mutuellement profitables. Ces coûts de transaction peuvent contribuer à des distorsions dans l'allocation du foncier pour l'agriculture.

Encadré 4-3 - La valeur de la terre en France en 2015

Selon les comptes de patrimoine de l'économie nationale de l'INSEE, les terrains cultivés représentent une valeur de 481,5 milliards d'euros en 2015 alors que la valeur des terrains supportant des bâtiments est presque 10 fois supérieure (4 782,5 milliards d'euros). De forts différentiels existent toutefois au sein de ces deux champs statistiques tels qu'abordés par les comptes de patrimoine d'un point de vue macroéconomique. Le prix de la terre agricole libre varie entre 0,14 €/m² dans le Haut-Jura et 140 €/m² pour une vigne en Appellation d'Origine Contrôlée Premier Cru en Bourgogne (Nouvelles séries de prix des terres, SSP-SAFER). Les terrains actuellement convertis vers l'urbain ne sont par ailleurs pas directement comparables à l'ensemble des surfaces bâties. Le prix d'un terrain pour y construire une maison individuelle se situe entre 19 €/m² dans le Limousin et 200 €/m² en Île-de-France (Enquête sur le prix des terrains à bâtir, SOeS).

4.3. Les facteurs locaux de conversion ou de résistance à l'artificialisation des terres agricoles

Dans un cadre périurbain, les facteurs de l'abandon d'exploitation agricole des terres ou de leur "sous-utilisation" sont profondément modifiés du fait de la pression foncière et de la fragmentation des territoires agricoles que l'insertion de surfaces artificialisées engendre. Comme on l'a vu plus haut, l'abandon de l'affectation agricole de l'usage d'une terre est l'expression spatiale d'un processus de marginalisation où l'exploitation agricole du foncier cesse d'être rentable au regard de la rente qu'une conversion de l'usage peut apporter. Ce n'est pas, vu au niveau local, vu un phénomène négligeable et il peut, sous conditions, constituer le point de départ de dynamiques d'artificialisation et d'étalement urbain, bien que l'arrêt d'une activité agricole ne signifie pas pour autant que les terres vont être vendues, ni changer d'affectation.

Comme vu plus haut, la pression foncière implique, dans les régions à forte densité de population, un coût d'opportunité d'occupation des terres défavorable à l'occupation agricole. Une étude très détaillée portant sur le sud de l'Espagne montre que ce sont les parcelles les plus proches des espaces urbanisés (0 à 1,2 km) et des routes (moins de 2,5 km) qui sont celles où l'abandon de l'agriculture lié à la vente des terrains pour des usages urbains sont les plus forts. Mais, du fait d'une tendance à l'intensification de l'activité agricole au sein de ces mêmes espaces (qui s'accompagne d'un changement de type de production et d'un maintien relatif des usages agricoles), les zones les plus sujettes à l'artificialisation ne se situent pas toujours dans la proximité immédiate de ces espaces. Ce sont les zones médianes, entre 1,2 à 5 km de distance du centre de l'espace urbanisé qui sont les plus sensibles à la conversion d'usage. On retrouve le même type de mécanisme dans des exemples canadiens, dans les plaines viticoles du sud de la France, etc. Le processus n'apparaît cependant pas linéaire et l'extension même de l'artificialisation des sols dans ces zones périurbaines peut au-dessus d'un certain seuil être freinée par la dynamique réactive de l'agriculture locale (encadré 4-4).

Encadré 4-4 – Processus non linéaire dans un contexte périurbain : l'effet de voisinage

Lorsque l'artificialisation commence, les effets de fragmentation des exploitations agricoles sont très importants et amplifient le processus commencé. Ce phénomène est appelé "effet de voisinage", c'est-à-dire qu'il incite les exploitations voisines de celles qui ont abandonné des parcelles à l'artificialisation, à le faire à leur tour. Au bout d'un certain taux d'artificialisation et de fragmentation des exploitations agricoles, démarre alors un processus de concentration des exploitations et de diminution de leur nombre, qui freine très largement le processus d'artificialisation, voire l'arrête.

Bien que peu nombreuses sur le sujet, les études montrent que les effets de la fragmentation des territoires agricoles et des exploitations agricoles qui s'y trouvent sont importants et qu'ils amplifient le processus entamé d'artificialisation. En plus d'une consommation accrue de terres agricoles locales, l'interpénétration de plus en plus complexe des espaces fonctionnels urbains et agricoles se trouve à l'origine d'une reconfiguration permanente des parcellaires agricoles, qui oblige à une adaptation continue des agriculteurs locaux à des conditions d'exercice de leur activité toujours changeantes et plus contraignantes. Ces tensions sont bien plus fortes que la simple part de la surface communale affectée à des usages non

agricoles et non forestiers pourrait le laisser penser : ainsi, par exemple, dans les communes périurbaines d'Île-de-France où ces tensions peuvent fortes, les surfaces artificialisées ne couvrent qu'entre 10 % et 20 % du territoire communal. Il semble néanmoins exister un palier, spatial et/ou temporel, où l'abandon agricole au profit de l'artificialisation, peut se ralentir dans les zones périurbaines.

On retrouve une dynamique de même nature au travers de l'analyse des conflits et des contentieux qui se développent dans les zones périurbaines. Les conflits autour de l'usage des sols sont de plusieurs ordres et touchent tous les domaines (pollution sonore ou olfactive, désagrément visuel, risque sanitaire, conservation de la nature ou du patrimoine, etc.). Dans cet ensemble, les conflits entre urbains ou ex-urbains et agriculteurs sont nombreux, sans pour autant être dominants ; ils sont en outre plus ou moins variables selon les forces et nuisances générées par chacune des parties en présence. Au-delà des conflits directs et contentieux liés aux changements d'affectation des sols, au travers desquels les terres agricoles sont considérées comme menacées par l'artificialisation, se développent également des conflits et contentieux inverses au sein desquels certaines pratiques ou installations agricoles sont vues comme des nuisances locales. Il est intéressant de constater qu'à partir d'un certain seuil, la diffusion de l'occupation résidentielle d'anciennes terres agricoles pose problème dans la mesure où les ménages sont prompts à vivre près de la Nature (même s'ils en ont une image fantasmée) et qu'ils souhaitent que les espaces dans lesquels ils s'installent conservent certaines des caractéristiques paysagères notamment qu'ils sont venus y chercher. L'agriculture a une place particulière dans cette image de la Nature qui explique la mobilisation possible de certains résidents récents contre de grands projets d'infrastructures ou des projets de développement résidentiel supplémentaire.

Toutes les exploitations agricoles, localisées en périurbain, ne sont pas sensibles de la même façon à la pression à la conversion de leurs surfaces agricoles. La situation financière de l'exploitant, son endettement, mais aussi les coûts d'ajustements ou coûts d'opportunités requis pour le changement d'activité (vente des actifs mobiliers et immobiliers, inadéquation de la formation professionnelle pour une activité autre qu'agricole...) influent largement sur les décisions des exploitants. Les caractéristiques socio-économiques de la famille de l'exploitant sont aussi intégrées dans les décisions de celui-ci. Deux facteurs augmentent la probabilité de cessation d'activité : le travail du conjoint à temps-plein hors de l'exploitation d'une part, et le fait que les deux conjoints aient été eux-mêmes élevés dans une exploitation agricole d'autre part. L'orientation de l'exploitation en production animale, en grandes cultures ou en maraîchage est un déterminant de la cessation ou du maintien d'activité. En effet, les niveaux de valeur ajoutée à l'hectare et donc les niveaux de rente agricole sont différents selon la nature des productions et les coûts irrécupérables sont plus importants en production animale, aussi est-il constaté que les régions dominées par les exploitations spécialisées en élevage sont moins sujettes aux cessations d'activité, à caractéristiques régionales socio-économiques équivalentes, que les régions spécialisées en production végétale.

Parallèlement, nombreuses sont les études qui se focalisent sur la résistance des exploitations périurbaines, comme faisant partie des facteurs de lutte contre l'étalement urbain. Elles témoignent d'une grande diversité de stratégies qui peuvent être regroupées dans le cadre d'adaptations multifonctionnelles au contexte périurbain. Il est ainsi difficile de déterminer si la forte densité de population renforce ou menace l'activité agricole : elle peut réduire le processus de déprise du fait des opportunités de marchés, comme l'accentuer en offrant des opportunités de travail en dehors de l'agriculture. Ainsi, l'existence de revenus secondaires de l'exploitant ou de sa famille peut accélérer la déprise tout comme elle peut contribuer à stabiliser l'activité agricole. Au-delà d'un certain seuil de revenus non agricoles, donc de pouvoir d'achat, on voit apparaître un effet positif sur la reprise des exploitations, qui s'appuie alors sur l'ouverture d'opportunités commerciales liées à de nouvelles habitudes alimentaires des ménages aisés. Cette situation a aussi pour effet de rendre certaines petites structures périurbaines moins dépendantes aux aides à la production de la PAC. Les exploitations périurbaines ont développé des adaptations très diverses pour se maintenir, mais qui ont pour trait commun des modalités d'intégration dans le système agro-alimentaire qui s'appuient justement sur la proximité urbaine. Certains exploitants se tournent vers des petites cultures à très haute valeur ajoutée (vignobles), vers des marchés de niche, la valorisation économique et sociale de la multifonctionnalité de l'agriculture ou plus souvent, par l'augmentation de la vente directe.

Intégrer les exploitations périurbaines aux projets alimentaires urbains. Une nouvelle voie de renforcement des revenus des exploitations apparaît depuis une à deux décennies avec le développement ou la montée en puissance de politiques locales, intégrant la question agricole dans les stratégies alimentaires urbaines (Encadré 4-5).

Encadré 4-5 – Le concept de "Foodshed" : l'aire de fourniture en alimentation

Concept nord-américain, le foodshed est la zone géographique qui fournit l'alimentation d'une ville. Si le type d'agriculture qui y est pratiqué est durable et équitable, les foodsheds de proximité sont une formidable opportunité pour le renforcement économique des exploitations périurbaines, et ce d'autant que ces programmes développent plusieurs logiques conjointes : une planification spatiale protectrice du foncier agricole proche des villes, des débouchés d'approvisionnement public local, mais surtout le développement d'infrastructures de connexion entre l'agriculture et la ville, comme l'ouverture de marchés.

Les programmes d'approvisionnement local des cantines scolaires (Farm to school program) sont perçus (surtout aux USA) comme une extension de ce phénomène et un levier puissant. Ce dispositif n'offre pas nécessairement un meilleur revenu aux exploitants, mais il permet à certains d'éviter la cessation d'activité en diversifiant les stratégies commerciales.

Les politiques alimentaires et agricoles locales réinterrogent l'usage des outils de planification. La protection de l'agriculture périurbaine via des instruments de planification librement mobilisés par les communes, serait plus efficace que les PLU, notamment car ils signalent une gouvernance locale mobilisée autour d'un projet agri-urbain de développement agricole qui se traduit, ensuite, par une volonté de protection du foncier agricole. Cette mobilisation est un puissant levier de protection des exploitations périurbaines, à condition qu'il intègre l'agriculture existante sur les territoires dans sa dimension multifonctionnelle.

4.4. Les politiques visant à limiter les pertes de terres agricoles par artificialisation

4.4.1. Le zonage comme outil de préservation des terres agricoles

Le droit de l'urbanisme et le droit rural prévoient des mesures de protection des terres identifiées comme étant agricoles, dans le but de maintenir leur vocation agricole. Ces mesures peuvent être considérées comme efficaces, mais des faiblesses dans leur mise en œuvre et les exceptions prévues par la réglementation viennent en limiter la portée. La façon dont le droit et les politiques publiques peuvent limiter l'artificialisation des sols sont développées plus loin, mais il convient de s'intéresser d'ores et déjà à la façon dont le droit préserve la disponibilité des zones agricoles.

Le droit de l'environnement prévoit des mécanismes de protection qui se traduisent par la délimitation de zones à l'intérieur desquelles l'artificialisation des sols est limitée voire proscrite. En cela, les espaces naturels se voient protégés, et ce, de manière plus stricte que les prescriptions qui accompagnent les zonages en droit de l'urbanisme. Leur emprise est croissante depuis les années 1970 et la protection qu'ils entraînent varie d'autant plus que leur nombre est grand.

Les zonages apparentés aux catégories I à III de l'UICN permettent d'assurer une totale inconstructibilité à court et long terme. Ils représentent 7 des 200 zonages environnementaux. Par ailleurs, des zonages de catégorie IV peuvent assurer la même inconstructibilité, mais il faut relever le faible impact des parcs naturels régionaux. En PACA par exemple, 8 % du territoire sont ainsi préservés du processus d'artificialisation.

La logique des zonages plus souples (qui, dans le cas de PACA, couvrent un espace 5 fois plus important, avec 43 % en moyenne des surfaces communales), suit un principe d'empilement dont l'accumulation permet de construire un gradient de protection autour des zones emblématiques.

Le droit de l'urbanisme et le droit rural ont également recours à la méthode du zonage. L'affectation de terrains en zone A (agricole) par les plans locaux d'urbanisme est en soi une forme de protection, bien que cette affectation puisse être remise en cause lors du renouvellement dudit document. En outre, les Zones agricoles protégées (ZAP) (article L.112-2 du Code rural) et les périmètres de protection et de mise en valeur des espaces agricoles et naturels périurbains (PEAN) (article L. 113-15 du Code de l'urbanisme) sont susceptibles de se superposer à la qualification des terres en zones A afin de consolider leur affectation. Créés par le législateur respectivement en 1999 et 2005, ces deux outils présentent un intérêt certain, mais demeurent insuffisamment mis en œuvre.

L'exemple du pôle métropolitain de Nantes Saint-Nazaire est cependant à mettre en exergue : les terres agricoles y sont particulièrement vulnérables du fait des faibles revenus et afin de les préserver, le département a mis en place un PEAN. Le PEAN des trois vallées est le plus important en France. Il couvre 17 000 hectares de terres agricoles sur le territoire de trois communes et joue le rôle de ceinture verte (Encadré 4-6).

Encadré 4-6 - Les frontières urbaines ou UGB (urban growth boundary) et les ceintures vertes

Les « Urban growth boundaries » (cf. chapitre 5), définissent une limite extérieure à l'extension de la ville pour une durée moyenne généralement longue, entre 10 et 20 ans et dans l'aire urbaine considérée, l'urbanisation hors des limites de l'UGB est proscrite. Les ceintures vertes procèdent d'une logique comparable avec une zone entourant la ville qui n'autorise que les usages agricoles ou le maintien en zone naturelle. Le modèle néerlandais combine politiques de préservation des espaces ouverts par le biais de réglementations de zonage, et planification nationale des zones d'expansion urbaine, incarnée dans des schémas relativement détaillés (Broitman & Koomen, 2015).

Par ailleurs, les zonages agricoles n'empêchent pas l'artificialisation des sols en leur sein lorsqu'elle est justifiée par l'usage agricole, et on observe une tendance à l'artificialisation croissante. Ainsi, la part des surfaces agricoles pour lesquelles un permis de construire a été obtenu entre 1980 et 2003 peut atteindre entre 55 % et 71 % du total des constructions non résidentielles (c'est le cas de la pointe de la Bretagne, de la Normandie, d'une partie du massif central par exemple). Dans ces régions, le rythme de construction de nouveaux ouvrages est à peine perturbé par l'évolution des aides à la production (quotas laitiers de 1984 ou réforme de 1992). La forte diminution du nombre de structures s'accompagne en effet d'un agrandissement constant des cheptels qui exigent le renouvellement des lieux de vie des animaux. 14 000 ouvrages sortent ainsi de terre chaque année entre 1980 et 1997. Sous l'effet de la restructuration, si le nombre de construction diminue, le volume de m² total lui ne faiblit pas et reflète une corrélation toujours forte entre restructuration agricole (notamment dans le

secteur laitier) et artificialisation des sols pour usage agricole (qui est comptabilisée par Teruti, mais souvent pas par CLC). Par ailleurs, les serres et « abris hauts » sont comptabilisées comme surfaces agricoles par Teruti et CLC, alors qu'elles impliquent le plus souvent une artificialisation du sol.

Enfin, dans un contexte de transition énergétique qui voit se développer des zones de production d'énergies renouvelables, les juridictions sont amenées de façon croissante à se pencher sur la question de la compatibilité des centrales photovoltaïques au sol avec l'affectation des terres à une activité agricole. Répondant à un besoin de clarification, une circulaire du Ministère de l'Environnement du 18 décembre 2009 prévoyait pourtant que « les projets de centrales solaires au sol n'ont pas vocation à être installés en zones agricoles, notamment cultivées ou utilisées pour des troupeaux d'élevage. Dès lors, l'installation d'une centrale solaire sur un terrain situé dans une zone agricole [...] est généralement inadaptée compte tenu de la nécessité de conserver la vocation agricole des terrains concernés. Toutefois, l'accueil d'installations solaires au sol peut être envisagé sur des terrains qui, bien que situés en zone classée agricole, n'ont pas fait l'objet d'un usage agricole dans une période récente. » Une concurrence probable, mais mesurée, entre ces deux usages est à étudier.

4.4.2. Politiques de soutien à la production agricole, déprise et artificialisation des terres agricoles

La politique de soutien à la production joue un rôle clé dans l'évolution du phénomène de déprise. L'augmentation des aides et des prix ralentit significativement le rythme de disparition des exploitations agricoles et freine la restructuration du secteur agricole imposée par l'évolution du marché. Afin de démontrer l'effet d'une libéralisation totale ou partielle, plusieurs scénarios d'évolution de la PAC ont été testés et une attention particulière a été portée sur leur impact en termes de déprise agricole. Ils prédisent une augmentation limitée de la déprise dans le cas d'une libéralisation partielle (-0,16 % de SAU), et plus significative (-9 à 7 % de SAU) dans le cas d'une libéralisation poussée du secteur agricole. Les principales zones de déprise sont localisées dans les régions de montagne, et au sein de celles-ci, sur les versants escarpés alors que les vallées et les plateaux sont moins touchés. Ces zones ne correspondent pas aux zones les plus menacées par l'artificialisation (Figure 4-2).

Par ailleurs, certains détracteurs de la réforme du découplage des aides et de la conditionnalité des mesures agroenvironnementales avançaient l'hypothèse que la mise en place d'une gestion plus environnementale du foncier agricole entraînerait un abandon des terres. La pratique montre que ce n'est absolument pas le cas et on ne peut raisonnablement considérer ces politiques comme un préalable à l'artificialisation des sols.

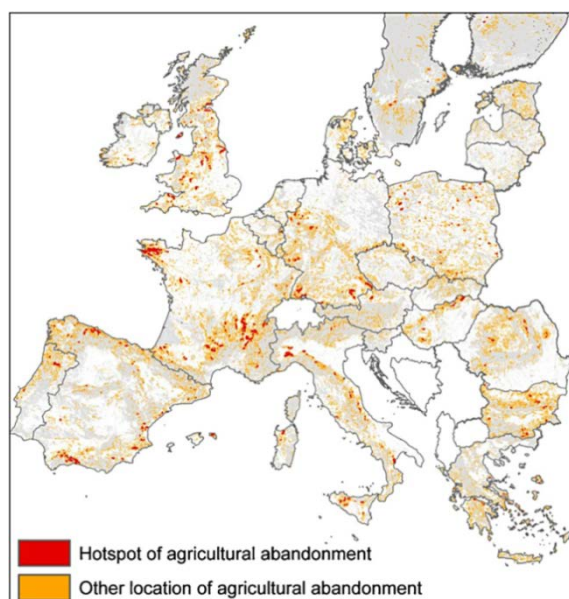


Figure 4-2. Aires projetées de déprise agricole selon un scénario de libéralisation de l'agriculture et des politiques commerciales à l'intérieur de l'UE

Encadré 4-7 – Effets de modulation spécifique à certains contextes territoriaux : la montagne

Du fait des caractéristiques pédoclimatiques spécifiques à la montagne, depuis le début du XIX^e siècle, 90 % des terres agricoles ont été abandonnées dans les Alpes, 20 % dans les Préalpes, et jusqu'à 85 % dans les Pyrénées. L'artificialisation en montagne est inégale, mais il est clair que le phénomène de construction des résidences secondaires est un fort déterminant d'artificialisation.

La vulnérabilité des exploitations agricoles en montagne est atténuée par des stratégies de diversification qui rendent ambiguë la nature du lien qui unit leur maintien au phénomène d'artificialisation. Le développement des revenus secondaires, issus principalement du tourisme est au cœur de cette question. Néanmoins, l'orientation vers une agriculture labellisée (AOP/IGP) renforce les exploitations, et en particulier celles en lien avec la production du fromage (à distinguer de l'agriculture de plaine).

En contexte urbain et périurbain, le développement d'exploitations labellisées ou intégrées dans des programmes de type *foodsheds* de proximité leur permet de résister mieux que les autres. Mais, ces exploitations le plus souvent de maraîchage ou d'élevage doivent engager des adaptations techniques importantes : conversion à l'agriculture biologique, construction de circuits de distribution directe ou de proximité, maîtrise des nuisances sonores et olfactives en cas de présence d'animaux d'élevage à proximité de zones résidentielles (gestion des flux d'animaux et délocalisation des bâtiments d'élevage). Une modification du système d'alimentation est souvent engagée avec une augmentation du fourrage au détriment du pâturage, ce qui peut devenir contradictoire avec les cahiers des charges des AOP/IGP.

4.5. Conclusions et leviers d'action

S'il est clair que l'artificialisation des sols a des effets sur les espaces agricoles, ceux-ci doivent être examinés tant sur le plan quantitatif que qualitatif. Sur le plan quantitatif, on observe des pertes irréversibles de surfaces agricoles. Si l'artificialisation des sols y joue un rôle souvent considéré comme prépondérant, ces pertes sont aussi dues au phénomène plus classique de déprise agricole liée aux cessations d'activité agricole. Ces dernières donnent lieu à d'importants flux de changements d'affectation des sols entre sols agricoles et sols forestiers et naturelles touchant des terres potentiellement moins productives et plus réversibles. Traduire ces flux en perte de production de biomasse agricole n'est pas chose aisée. Tout au plus, peut-on tenter d'évaluer la perte de capacité productive due à l'artificialisation de terres agricoles. Même si les pertes de terres agricoles par artificialisation concernent des sols de bonne à très bonne capacité productive, les pertes de production qu'elles pourraient engendrer, sont, pour une large part, compensées par une intensification accrue de la production de biomasse sur les autres terres agricoles. Sur un plan plus qualitatif, certaines des formes prises par l'artificialisation, comme le mitage ou la fragmentation des territoires agricoles par l'habitat ou certaines infrastructures de transport, démultiplient les zones de contact entre l'agriculture et les territoires artificialisés, ce qui procure des gênes et nuisances réciproques entre résidents et agriculteurs et peut perturber l'organisation de l'activité et du travail agricole. Sur ces questions, l'état des lieux de la littérature scientifique souligne davantage des besoins de recherche en la matière qu'il ne permet de tirer de conclusions.

Cela étant dit, dans la perspective de limiter les pertes de terre agricoles à moyen et long terme, afin de préserver les capacités de production agricoles de la France et éviter d'entraver le travail des agriculteurs, des leviers d'action existent.

Dans un premier temps, les décisions conduisant à l'artificialisation des sols agricoles prennent insuffisamment en compte la qualité des sols visés par les projets de conversion. Par conséquent, il est difficile d'estimer l'exact impact de l'artificialisation des sols sur l'agriculture, qu'il s'agisse des quantités produites, mais aussi de l'environnement agricole plus largement. Un important et principal levier d'action réside dans l'amélioration des connaissances des sols agricoles en France, à l'échelle de la parcelle. Ce levier est cependant conditionné par l'acceptation d'une définition de la notion de qualité des sols.

Dans un second temps, il ressort des analyses statistiques une faible réversibilité des sols agricoles devenus imperméabilisés, la réversibilité des sols artificialisés concernant presque exclusivement les sols enherbés, nus ou simplement stabilisés. C'est bien cette catégorie d'artificialisation qu'il conviendrait de mettre en avant dans les suivis d'occupation du sol pour évaluer plus précisément son impact sur l'agriculture. En effet, à long terme et dans un contexte de changement climatique, cette réversibilité est centrale dans la mesure où des études montrent que les usages agricoles localisés peuvent être amenés à évoluer, du fait de la disponibilité de la ressource en eau et de l'évolution du climat. Si l'artificialisation des sols agricoles est décidée, les projets d'aménagement devraient prendre en compte et privilégier cette réversibilité future.

Les politiques de zonage apparaissent comme un outil au fort potentiel, mais leur mise en œuvre ne semble pas toujours être suffisamment efficace pour maîtriser l'artificialisation des sols agricoles. De ce fait, se pose la question du bon échelon de gouvernance des terres agricoles. L'intercommunalité semble en l'occurrence plus appropriée, mais avec le maintien voire le renforcement d'un contrôle qui s'effectuerait à l'échelon supérieur : la région ou l'Etat. Les hypothèses de renforcer, d'une part, l'outil de réserves foncières, et, d'autre part, la fiscalité sur la vente de terres agricoles devenues constructibles sont deux leviers qu'il conviendrait d'étudier davantage. À défaut d'une taxation adaptée, ou d'un système de capture de la rente agricole comme aux Pays-Bas, une utilisation plus fréquente des « Zones d'aménagement différé », permettrait de limiter les effets d'anticipation des aménageurs.

Enfin, tous les types d'agriculture n'offrent pas les mêmes capacités de « résistance » face au phénomène d'artificialisation des sols. Dans un contexte périurbain avec une forte pression foncière, l'agriculture de niche, mais aussi l'agriculture intégrée dans un système d'alimentation territorialisée (SAT), s'avèrent plus pérennes que l'agriculture conventionnelle. La gouvernance participative et locale est alors centrale.

5. Stratégies de localisation des ménages et construction de logements

Après avoir analysé les impacts environnementaux et les conséquences sur le secteur agricole de l'artificialisation des sols, il nous faut maintenant en préciser les acteurs et examiner en détail les processus par lesquels ils interviennent dans ce mouvement d'ensemble. On repère trois grands types d'activités se déployant sur les sols artificialisés : l'habitat et le logement, destiné directement à la consommation des ménages ; les activités économiques, qu'elles soient industrielles ou tertiaires (et auxquelles on assimile le plus souvent les administrations et les services publics) ; les infrastructures de transport qu'elles relient les villes entre elles ou qu'elles desservent les espaces urbains ou périurbains.

Bien que les surfaces destinées à l'habitat ne représentent, en 2014 et selon Teruti-Lucas, que 42 % des surfaces déjà artificialisées, l'attention se porte le plus souvent sur cette utilisation du sol parce que son rythme d'extension semble être le plus rapide. En effet, toujours d'après Teruti-Lucas, près de la moitié des surfaces nouvellement artificialisées entre 2006 et 2014 l'ont été pour de l'habitat individuel ou collectif (Figure 5.1), l'habitat collectif ne représentant que 14 000 des 242 000 d'extension des surfaces artificialisées pour l'habitat. Notons néanmoins que, si ce flux est nettement plus important que ceux destinés aux activités économiques ou aux infrastructures de transport, il est globalement moins imperméabilisant que les autres flux puisque seulement 111 000 des 242 000 hectares concernés par ce flux sont à terme bâtis, revêtus ou stabilisés, alors que 220 000 des 243 000 hectares destinés aux infrastructures ou aux activités économiques sont dans ce cas à l'issue de leur artificialisation. Ainsi, l'extension des surfaces destinées à l'habitat mélange des modes de couverture des sols aux impacts environnementaux variés.

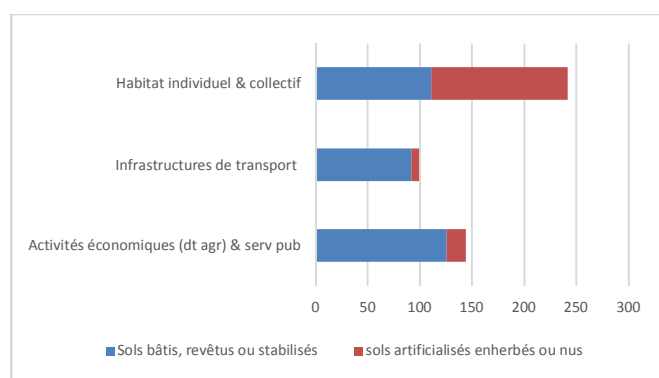


Figure 5-1. Solde des flux 2006-2014 des sols artificialisés selon l'utilisation du sol (en milliers d'hectares). Source : Agreste, 2015

Pour comprendre les processus qui sous-tendent les mouvements d'extension des surfaces destinées à l'habitat, il nous faut revenir aux mécanismes qui expliquent la localisation résidentielle des ménages et la façon dont ils façonnent les paysages urbains et non urbains. Au-delà du processus d'urbanisation, ces mécanismes se traduisent par l'actuel mouvement de périurbanisation tout d'abord résidentielle, qui diffuse l'artificialisation des sols au-delà des frontières de la ville. En s'appuyant sur ces mécanismes, plusieurs instruments de politiques publiques peuvent être envisagés pour limiter l'extension de l'artificialisation tant en milieu urbain que périurbain, sans pour autant remettre en cause l'accès au logement et/ou entraver la dynamique du secteur de la construction.

Encadré 5-1- Analyse du corpus "Localisation des ménages et des entreprises"

Le thème qui s'intitulait « Dynamiques foncières et immobilières » a donné lieu à l'extraction de 1 574 références dans les bases de données internationales Econlit, WOS et Scopus. Parmi celles-ci, 4 comportaient le terme *artificializ/s/ation* dans le titre, les mots-clés ou le résumé (0,25 %). Aux 164 références retenues dans l'analyse pour examiner la localisation des ménages et des entreprises (qui se trouvent ventilées ici entre les chapitres 5 et 6), ont été ajoutées 202 nouvelles références issues d'interrogations complémentaires.

La représentation de travaux portant sur la France est comme le plus souvent assez faible, la dominante des pays étudiés étant les Etats-Unis. En outre, des pays ou régions ont été exclus, comme ceux dans lesquels il n'y a pas de marché foncier (ex. : Chine, plusieurs pays africains) ou peu de terres urbanisables (ex. : Singapour).

5.1. Préférences des ménages, extension urbaine et périurbanisation

Les mécanismes de choix résidentiel des ménages poussent assez nettement à l'extension urbaine et à la périurbanisation. Mais, en parallèle à ce schéma, la densité des surfaces construites à périmètre urbanisé constant le plus général semble se renforcer, y compris dans le périurbain. Il y aurait donc un double phénomène d'expansion/densification, que des études trop focalisées sur l'étalement tendent à oblitérer et qui pousse certains auteurs à parler de réurbanisation.

5.1.1. L'arbitrage de localisation résidentielle des ménages : entre demande de services résidentiels, préférence pour les attributs des lieux et les voisinages socio-économiques

Les modèles de base de l'économie urbaine analysent le processus de localisation résidentielle des ménages à partir d'un arbitrage entre des coûts liés à la demande de logement et des coûts de transport supportés par des ménages qui cherchent à se localiser autour d'un centre d'emploi au sein duquel ils travaillent. Les premiers ont tendance à s'accroître avec la concurrence pour l'occupation des sols qui s'aiguise à proximité du centre avec l'augmentation des densités, alors que les seconds (qu'ils soient directement monétaires ou exprimables en coût d'opportunité du temps consacré en déplacement) tendent à diminuer pour ceux qui peuvent se localiser à proximité de ce même centre. C'est au travers de ce schéma très simple que l'on peut rendre compte du mouvement d'étalement des villes autour de leur centre. Celui-ci est d'autant plus soutenu que le poids des dépenses que les ménages affectent à leur logement s'accroît plus vite que celui des dépenses relatives au transport, comme c'est le cas pour les ménages français depuis plusieurs décennies (Encadré 5-2).

Encadré 5-2 – Quelques caractéristiques des ménages français en matière de choix de logement

Les dépenses affectées au logement représentent, en 2014, 20,1 % du budget des ménages français (contre 18,5 dix ans plus tôt), alors que le coefficient budgétaire du poste Transport passe de 10,6 à 9,8 entre 2004 et 2014 (INSEE, Comptes nationaux, base 2010).

Les décohabitations des enfants, l'allongement de la durée de vie, l'évolution des structures familiales expliquent la diminution de la taille des ménages et l'augmentation de la demande en logements. Les petits logements, plutôt localisés au centre-ville sont difficilement accessibles à ceux qui ont perdu des revenus et cela alimente la croissance de la surface à urbaniser. L'exemple de Berlin montre que le vieillissement de la population et l'augmentation des ménages de petite taille favorisent le développement des constructions dans le périurbain proche de la ville, tout en diminuant les constructions dans la ville dense et dans le périurbain plus éloigné.

En France, 58 % des ménages habitent des maisons individuelles. Lorsqu'on demande aux français le type d'environnement résidentiel dans lequel ils souhaiteraient vivre, 56 % se prononcent pour la maison individuelle isolée, 20 % pour la maison individuelle en ensemble pavillonnaire, et 11 % pour le petit habitat individuel en ville, ce qui représente 87 % des Français qui souhaitent un habitat individuel. Un déménagement est motivé par l'accès à un jardin (23 %), une pièce en plus (22 %) ou une vue agréable et dégagée (19 %). Les aménités vertes et paysagères, plutôt associées à l'environnement périurbain, sont nettement plébiscitées. 82 % des Français placent des espaces verts à moins d'un kilomètre de leur domicile quand on leur demande de dessiner leur environnement résidentiel. C'est aussi le manque de grandes maisons ou appartements dans les cœurs des villes qui conduit à la préférence pour le périurbain. On observe de même dans certaines villes américaines comme Toronto un regain d'intérêt pour le centre et les copropriétés.

Ce mouvement est accentué par la conjonction de trois phénomènes complémentaires : la croissance démographique, la population de la France métropolitaine devant passer, selon les projections de l'Insee, de 64,5 millions en 2015 à quelque 73,6 millions en 2060, soit une augmentation d'environ neuf millions d'habitants (+ 14 %) ; la diminution de la taille des ménages (Encadré 5-2) qui se traduit mécaniquement par une augmentation de la demande de logement ; et, la préférence qu'expriment les ménages (notamment français) pour l'habitat individuel (Encadré 5-2), ce qui accroît la demande en sols artificialisés tant pour le bâti que pour les jardins attenants.

A ces trois composantes, s'ajoutent le rôle ambivalent des attributs des lieux, aménités naturelles *versus* urbaines (Encadré 5-6), et celui associé aux bénéfices que les ménages peuvent retirer des interactions sociales, les amenant le plus souvent à se rapprocher de leurs semblables. Ces deux éléments essentiels dans la dynamique de construction et d'extension des surfaces destinées à l'habitat seront discutés plus loin.

Dans ces conditions, la relation entre croissance démographique et extension des espaces urbanisés n'est pas linéaire. Dans tous les pays industrialisés, la deuxième est plus rapide que la première et la France n'y fait pas exception. Parallèlement, en examinant l'évolution de la densité urbaine (nombre d'habitants par km²), on observe une hausse de celle-ci indiquant une consommation plus intensive de l'espace urbain en même temps que le mouvement d'étalement. Au total, Angel (2011) projette, selon le scénario retenu, une croissance de 75 à 190 % des espaces urbanisés de 2000 à 2050 pour l'Europe et le Japon, fourchette cohérente avec l'expansion urbaine que la France a connu au cours du demi-siècle dernier.

Ainsi, le double mouvement de concentration urbaine et d'étalement urbain, caractéristique des pays dits industrialisés, se traduit par une avancée des frontières de la ville et un mouvement de dispersion de l'habitat, notamment individuel, dans les espaces périurbains, particulièrement marqué en France.

5.1.2. De l'étalement urbain à l'émergence des espaces périurbains

La forme urbaine classique consiste en une expansion plus ou moins régulière de la ville sur l'espace immédiatement environnant, avec une organisation en cercles concentriques caractérisés par un gradient de densité de construction décroissant avec la distance au centre. Toutefois, il est fréquent d'observer des dynamiques de construction immobilière non-continue par rapport à l'espace urbain : c'est le cas du développement périurbain fragmenté et disjoint, tel qu'en France qui se traduit par un mitage de constructions immobilières saupoudrées au milieu d'espaces agricoles, forestiers ou naturels. Le développement fragmenté peut avoir lieu sur toute la périphérie de la ville, de manière satellitaire (regroupement localisé de lots fragmentés), dispersée (distribution diffuse des constructions dans l'espace) ou encore en bandes construites disjointes les unes des autres. A moins de définir un zonage strict, planifié, les zones de transition entre l'espace urbanisé et l'espace rural ont toujours des formes particulières qui traduisent le front de l'artificialisation par connexion de noyaux et/ou par diffusion le long d'axes.

5.1.3. La périurbanisation des ménages en France

La périurbanisation est une tendance de fond qui a débuté dans les années 1970, et même plusieurs années auparavant en Île-de-France. Ralentie dans les années 1990, les chiffres de la décennie 2000 montrent au contraire une reprise du phénomène, en particulier autour des plus grands pôles urbains. La périurbanisation s'est opérée par extension spatiale du périmètre d'influence des villes, c'est-à-dire par accroissement du nombre de communes dont une part importante de la population active effectue quotidiennement des déplacements domicile-travail entre leurs communes de résidence (non inclus dans le pôle urbain) et celui-ci. Le développement de ce périurbain fragmenté et disjoint de la ville se traduit par un mitage de l'espace, alternant constructions immobilières et enclaves agricoles, boisées ou naturelles plus ou moins étendues. C'est dans ces espaces que domine la problématique de l'extension des surfaces artificialisées au détriment des surfaces agricoles. Le rôle des propriétaires de foncier agricole et leur arbitrage de rente tel que décrit au chapitre précédent, sont les ressorts essentiels des possibilités d'extension de l'habitat en périurbain.

Ce développement fragmenté peut avoir lieu sur toute la périphérie de la ville ou de manière satellitaire (regroupement localisé de lots fragmentés) ou encore en bandes construites disjointes les unes des autres. Ce mouvement s'est historiquement opéré en deux temps : tout d'abord, par augmentation du nombre de communes dites périurbaines, avant de se poursuivre par un phénomène de densification dans ces communes, par contraste avec le recul des villes-centres (Figure 5-2). Les années 1990 sont marquées par une reprise démographique de ces villes et de leur banlieue.

Aujourd'hui, la périurbanisation prend des formes plus complexes et variées. En particulier, elle procède plus souvent par l'intégration de bourgs et petites villes anciennement rurales ou l'accroissement de la taille de communes périurbaines, ce qui participe de l'évolution des espaces métropolitains vers des structures plus multipolaires.

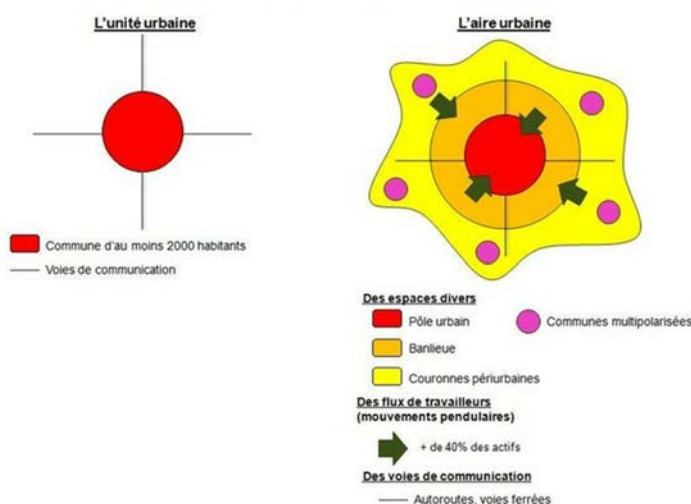


Figure 5-2. Entre le centre, la banlieue, le périurbain diffus et ses centres secondaires © Aguilera, Bonin 2017

• Une vision du périurbain en permanente évolution

Sans minimiser les problèmes environnementaux et sociaux posés par la périurbanisation (en particulier via les pratiques de déplacement des périurbains), un ensemble de travaux proposent aujourd'hui des jugements plus mesurés, qui visent à dépasser l'enthousiasme initial d'une nouvelle dynamique des espaces ruraux par la périurbanisation (par la contre-urbanisation ou la suburbanisation selon les dénominations qui ont fait débat à la fin du siècle dernier) ou, à l'inverse, l'image

d'habitants contraints à s'éloigner des centres urbains, relégués dans des territoires sans âme et repliés sur leur maison avec jardin. Ces approches invitent à reconsidérer les moyens à mettre en œuvre pour inscrire les territoires périurbains dans des trajectoires plus durables.

Un quart à un tiers de la population européenne étant installée dans le périurbain, de nouvelles lectures de la périurbanisation sont proposées mais peuvent faire controverse. Ainsi, certains auteurs considèrent aujourd'hui que les habitants font état de choix résidentiels construits en relation avec un projet de vie qui accorde notamment une grande importance à la proximité aux espaces naturels, et un sentiment partagé de "vivre à la campagne". La qualité de vie est plébiscitée, et l'ancrage dans ces territoires est revendiqué : les projets de (re)déménagement sont rares, et en général les ménages envisagent de demeurer dans une commune périurbaine et non de revenir vers la ville dense. Ce sont exactement ces mêmes motifs qui ont fait le succès des premiers mouvements de périurbanisation à partir du milieu des années 1960. Les modes de vie des périurbains ont, par ailleurs, évolué et ne s'inscrivent plus dans un rapport de dépendance forte aux centres urbains.

Encadré 5-3 – Growth machine hypothesis et Homevoter hypothesis : freins à la densification périurbaine

Selon la **growth machine hypothesis**, les promoteurs et les propriétaires de terrains non-bâti exercent une pression politique, mais pour des politiques d'aménagement urbain moins contraignantes.

Selon la **homevoter hypothesis**, les propriétaires ont intérêt à soutenir politiquement, par le vote, les équipes municipales qui mettent en place des politiques d'aménagement urbain contraignantes car cela augmente leur capital. Comme l'offre est alors moins élastique, cela les assure contre des chocs venant affecter la valeur de leur capital. Différents tests de cette hypothèse montrent qu'effectivement, les municipalités avec une large part de propriétaires tendent à mettre en place des politiques restrictives, non seulement aux Etats-Unis mais aussi en France.

On distingue donc deux étapes : une **phase de croissance démographique** forte, tirée par des logiques foncières portées par des propriétaires fonciers ruraux ; et une **phase de stabilisation**, associée à des politiques de préservation du cadre de vie portées par des périurbains nouvellement arrivés et qu'ils veulent maintenir leur cadre de vie et une densité faible d'habitat.

• (Re)composition sociale des tissus moins denses

L'image d'un « club » périurbain porté par un entre soi est assez fréquente et les travaux sur les processus de verrouillage de ces espaces (Encadré 5-3) participent à la "mauvaise presse" de ces espaces. Cet entre soi socio-spatial se matérialise par des espaces dédiés à des catégories de population, les plus aisées vivant au plus près des aménités et allant jusqu'à le matérialiser par une fermeture comme c'est le cas pour la majorité des *gated-communities*, résidences ou quartiers fermés, lesquels tendent à se développer en France.

Néanmoins, pour les ménages les plus modestes, ce choix (périurbain-rural) peut avoir des conséquences dommageables sur leur paupérisation, leur captivité ou leur isolement dans ces territoires où commerces et services sont moins accessibles.

Le renouvellement ou la recomposition sociale des espaces peu denses, souvent analysés comme s'effectuant au détriment des populations autochtones, plus agricoles, est tout autant porteur d'une diversification sociale. En effet, les ménages provenant du desserrement résidentiel tendent à se mélanger de plus en plus. Si la population agricole y décroît, marquant un changement des pratiques agricoles et donc des paysages, ces zones connaissent, du moins en Amérique du Nord, une croissance démographique, avec parfois une insertion professionnelle agricole.

5.1.4. Inégalités sociales, configuration urbaine et consommation foncière

Lorsque les ménages ont les mêmes préférences et ne diffèrent que par leurs revenus, l'économie urbaine montre que les ménages défavorisés se localisent dans un cercle central proche du centre d'emplois tandis que les ménages aisés habitent dans un anneau qui entoure ce cercle. Lorsque les préférences des deux groupes sociaux diffèrent, les ménages à haut et à bas revenu se localisent dans le centre ou en périphérie selon l'élasticité-revenu de leur demande d'espace résidentiel et d'accessibilité. En réalité, la localisation des ménages selon leur revenu est guidée non seulement par la distance au centre mais aussi par la **présence d'aménités** (Encadré 5-6), qui conduit à deux types dominants de configuration urbaine.

Lorsque l'espace est homogène et isotrope et que les ménages ne diffèrent que par leur revenu, la ségrégation socio-spatiale est le produit normal du fonctionnement du marché foncier : des ménages semblables font des choix identiques qui les conduisent à des co-localisations. Par défaut (et donc sans rééquilibrage), le **marché foncier génère de la ségrégation socio-spatiale**. Lorsque l'espace n'est pas homogène, du fait de la présence d'aménités naturelles, historiques ou modernes ou du voisinage social, les conclusions de l'économie urbaine sont plus incertaines : des configurations avec des ménages riches au centre et pauvres en périphérie (exemple : Paris) ou l'inverse (exemple : villes de l'Ouest américain) sont possibles. En effet, dans la ville européenne, les aménités historiques et modernes sont abondantes dans les métropoles, ce qui conduit les ménages aisés à choisir ces localisations centrales où le foncier est cher. A l'inverse, dans la ville étatsunienne, qui s'applique à la plupart des villes de l'Ouest des Etats-Unis, le cœur des villes est pauvre en aménités alors qu'elles sont abondantes en périphérie. Dans ce cas, les ménages aisés choisissent ces localisations excentrées où les valeurs foncières

peuvent être supérieures à celles du centre. C'est l'histoire et la géographie (dotation en aménités) ou la sociologie et la science politique (qualité sociale du lieu), plus que l'économie, qui expliquent celle qui prévaut. Or, selon que ce sera l'une ou l'autre, la consommation urbaine en terres en périphérie sera différente.

Encadré 5-4 - La ville s'organise en quartiers socio-culturellement homogènes

Les choix de localisation sont associés aux bénéfices retirés des interactions sociales. Les densités sociales permettent de satisfaire les besoins d'identification sociale des ménages et questionnent les types d'organisation sociale de la ville en présence de ménages aux caractéristiques socio-économiques différentes selon les niveaux de revenus, les classes sociales, les nationalités, les cultures, les races, etc. La littérature sur les « effets de voisinage » présuppose des externalités positives attachées aux voisinages aisés et éduqués et, au contraire, des externalités négatives pour les voisinages défavorisés. La ségrégation domine les formes urbaines d'équilibre.

Il existe un lien à double sens entre consommation foncière et inégalités sociales : la localisation excentrée des ménages à haut revenu dans un espace homogène et, plus encore, hétérogène (aménités, offre de biens publics locaux, voisinage social), est source d'inégalité socio-spatiale et elle accroît la consommation foncière résidentielle. Des politiques publiques réduisant soit l'inégalité sociale, soit la consommation foncière des ménages aisés vont dans le même sens : si les pouvoirs publics visent ces deux objectifs, il s'agit de politiques gagnant-gagnant.

Les travaux appliqués ou de statistique descriptive montrent une localisation préférentielle des ménages aisés dans les banlieues excentrées ou le périurbain proche, contribuant ainsi à l'inégalité sociale des lieux (et à une consommation importante de terres agro-forestières). Il ne faut cependant pas exagérer cet effet inégalitaire : c'est au sein des unités urbaines que les contrastes sociaux sont les plus marqués et ce d'autant plus qu'elles sont grandes, les ceintures périurbaines apparaissant moins inégalitaires. Et, la périurbanisation a contribué à ces inégalités socio-spatiales : les migrations de catégories sociales moyennes à aisées vers ces couronnes a contribué à la ségrégation sociale dans les villes.

Encadré 5-5 - La construction de logements sociaux

La construction massive de logements sociaux dans les Trente Glorieuses a permis de loger de nombreuses familles des classes moyennes et populaires. Avec le temps, la piètre qualité des logements et leur localisation en périphérie explique en partie le niveau actuel de ségrégation des populations défavorisées. Les études montrent que les populations les plus pauvres sont reléguées dans les logements sociaux les moins valorisés. Ce n'est pas le logement social qui est en cause, mais la concentration de la pauvreté. Les dynamiques du marché immobilier sont génératrices de segmentation spatiale, mais les règles de fonctionnement du logement social, qui le rendent éligibles à une large part de la population, sans pouvoir contraindre un ménage dont le revenu aurait augmenté à quitter un logement, ont également contribué à une polarisation du parc HLM.

5.1.5. Conséquences sur les ménages urbains de la périurbanisation des emplois

Lorsque les emplois se décentrent vers le périurbain ou les banlieues éloignées (ce qui est actuellement le cas en France¹⁶), ce mouvement peut renforcer la vague de relocalisation des ménages vers la périphérie, le facteur principal de localisation des résidents sur le territoire restant l'accès aux emplois.

Mais, si les employés sont contraints de rester localisés au centre ou dans les banlieues proches, il peut en résulter un mauvais appariement spatial entre offre et demande sur le marché du travail, dû principalement à une augmentation des distances domicile-travail. Ainsi, si les ménages aux revenus les plus faibles sont aux centres-villes, ils sont pénalisés lorsque les emplois sont déplacés en périphérie. Dans le cas inverse, lorsque ces ménages sont loin du centre, le déplacement des emplois est également pénalisant.

Une politique restrictive en matière d'urbanisation et d'étalement des villes est donc également favorable à un meilleur appariement, bien que de telles politiques foncières restrictives réduisent la fluidité des marchés. Toutefois, ce mécanisme n'a probablement pas une portée générale : il demanderait à être précisé par des études locales. De plus, au niveau national, l'allongement des navettes des ouvriers et employés ne s'observe pas en France entre 1984 et 2006 et il est moindre pour ces catégories sociales que pour les classes supérieures de 2006 à 2013.

¹⁶ Sur près de quarante ans, les croissances les plus rapides de l'emploi se sont effectuées en France dans la proche banlieue des grandes agglomérations françaises, plutôt que dans leurs périphéries les plus excentrées.

5.2. Le débat sur le rôle des aménités dans l'artificialisation des sols

Comme on l'a vu plus haut, les aménités interviennent dans l'arbitrage de localisation résidentielle des ménages, le plus souvent en complément des coûts de logement et des coûts de transport. Elles peuvent néanmoins jouer un rôle différent selon l'échelle à laquelle on se place. On peut distinguer leur rôle à l'échelle de l'espace intra-urbain, entre les zones urbaines et périurbaines (5.2.1), à l'échelle régionale, entre aires urbaines (5.2.2) ou à l'échelle de la France entre espaces de haute valeur environnementale et les autres (5.2.3).

Encadré 5-6 – Les attributs des lieux : les trois grands types d'aménités

Les aménités naturelles correspondent aux caractéristiques topographiques de l'espace - par exemple une rivière, ou un bord de mer. Les aménités historiques caractérisent quant à elles l'aspect esthétique et patrimonial de la ville - par exemple les monuments, l'architecture ou les espaces verts. Enfin, les aménités modernes sont caractérisées par la présence ou l'absence d'équipements publics, de théâtres, ou l'état de rénovation des aménités historiques. Ces deux dernières catégories d'aménités sont des externalités positives.

5.2.1. Aménités et équilibre spatial intra-métropolitain, entre zone urbaine et périurbaine

La croissance démographique et la consommation de foncier par ménage sont deux facteurs de pression foncière. Les différences spatiales de pression foncière dues aux aménités dépendent donc de l'influence des aménités sur ces deux facteurs. Les aménités environnementales, classiquement caractérisées par leur distance au centre-ville, peuvent influencer les formes urbaines. Lorsque l'on prend en considération ces aménités plus fortes en périphérie qu'au centre, la fonction d'enchère foncière des ménages n'est plus nécessairement strictement décroissante avec la distance au centre-ville. Les ménages sont prêts à enchérir pour des localisations éloignées du centre-ville malgré des coûts de transport plus importants ce que traduit leur consentement-à-payer pour bénéficier de ces aménités. Cette non-monotonie peut expliquer l'apparition d'une forme fragmentée de développement résidentiel. Toutefois, dans le cas le plus fréquent, les enchères foncières des ménages et des entreprises restent plus élevées au centre des villes.

- Les espaces verts urbains, des aménités souvent attractives.

Ce cadre d'analyse peut également être appliqué au rôle des aménités urbaines, celles-ci étant le plus souvent « historiques » ou « modernes » mais pouvant également prendre la forme d'aménités « naturelles » localisées dans la ville-centre. De nombreuses analyses, fondées sur la décomposition des prix immobiliers en prix hédoniques, convergent pour attester de la forte valorisation des espaces verts urbains et donc de leur rôle potentiel dans une nouvelle attractivité des villes-centres. L'introduction de cette composante d'espaces verts urbains, dont on sait qu'elle est susceptible d'atténuer les impacts environnementaux de l'urbanisation, pourrait en outre être favorable à une reconcentration de l'habitat ou à une « recompaction » de la ville, limitant d'autant l'extension de l'artificialisation des sols.

Encadré 5-7 – Controverses autour de la ville compacte

La ville compacte est promue car elle permet de diminuer certains des impacts environnementaux de l'urbanisation (cf. chapitres 2 et 3) et préserve les sols. Elle vise aussi à diminuer les émissions de GES en réduisant les déplacements. La densification par augmentation des hauteurs de bâti remplit ces objectifs, parfois au détriment du bien-être de la population et au prix de coûts de construction souvent considérés comme prohibitifs par les promoteurs, alors que la densification par remplissage des espaces disponibles (smart growth) modifie l'usage des sols. A l'inverse, à une échelle plus locale et sans aménagement spécifique, ces deux formes altèrent la qualité de l'environnement urbain : diminution de l'ensoleillement, augmentation du ruissellement, création d'îlots de chaleur, altération des aménités associées aux espaces ouverts. Et, pourtant, la densification est un objectif affirmé de nombreuses politiques territoriales observé au sein de la majorité des pays de l'OCDE (2017).

Cependant, puisqu'il s'agit de biens publics, les espaces naturels et les parcs et jardins peuvent entraîner des externalités négatives (sources de bruits, nuisances et délinquances). C'est en particulier vrai dans les quartiers les moins favorisés. Dans une revue de littérature, Lailie *et al.* (2013) montrent qu'en effet, près d'une étude hédonique sur six mesure des valeurs négatives pour les espaces naturels en ville. Cela dépend donc si l'espace est intégré dans une politique urbaine (aménagé, entretenu, surveillé) ou laissé à l'abandon. La question se pose également de la perception des espaces urbains compris dans une trame verte.

- Les limites des aménités périurbaines

En dehors des lieux remarquables, les aménités du périurbain sont essentiellement les aménités naturelles forestières et agricoles dont les résidents viennent chercher la proximité. Mais, habiter ces espaces, c'est aussi les artificialiser ce qui modifie la valeur d'option des espaces environnants. En effet, l'urbanisation d'une parcelle modifie la probabilité d'urbanisation des

parcelles adjacentes car leur valeur d'usage résidentiel a diminué. Les habitants du périurbain se "nuisent" ainsi les uns les autres par le biais de leur choix résidentiel. Il émerge donc une construction des paysages périurbains qui résulte, d'une part, des choix de localisation des ménages, qui recherchent l'espace et la proximité aux paysages agricoles et forestiers, et, d'autre part, de la rentabilité de l'agriculture. La valeur d'aménité des derniers espaces à urbaniser peut être suffisamment faible pour qu'ils ne le soient pas, donnant naissance à un espace mixte, voire mité, où coexistent usage résidentiel et usage agricole, coexistence caractéristique des espaces périurbains mités par l'habitat individuel.

Cette coexistence d'activités résidentielles et agricoles est porteuse de conflits entre urbains et agriculteurs en zone périurbaine. Ceux-ci sont nombreux et plus ou moins variables selon les forces et nuisances générées par chacune des parties en présence. En l'occurrence, certains grands exploitants agricoles disposent d'un pouvoir économique et de représentation qui les conduit à tenter d'influencer les politiques pour favoriser leur développement. Mais, le plus souvent, ces activités agricoles tendent à s'éloigner des franges urbaines pour éviter une partie de ces conflits.

Lorsque les aménités sont plus ponctuelles et plus localisées (comme, par exemple, le long du littoral, d'une rivière ou d'un lac), la consommation d'espace par les ménages est moindre aux alentours de ces lieux, du fait de prix fonciers plus élevés. Les densités de population y sont également plus élevées. En outre, les prix élevés du foncier engendrent de la ségrégation sociale. Lorsque ces aménités sont localisées loin du centre-ville, ou que les aménités du périurbain l'emportent, alors la forme de la ville s'étend vers les zones d'aménités, éventuellement de manière discontinue, engendrant du mitage.

La forme, la localisation et le type des aménités et d'externalités (urbaines, naturelles, sociales) sont donc des éléments cruciaux pour comprendre les phénomènes d'artificialisation et de ségrégation. Par exemple, la protection de zones naturelles peut accentuer la pression foncière à proximité de ces zones. Par ailleurs, en concentrant la présence de ménages aisés, les aménités accroissent la base fiscale des communes et favorisent la fourniture de biens et services.

5.2.2. Rôle des aménités dans l'équilibre spatial entre les villes et/ou entre les régions

Aux côtés des déterminants classiques des prix des logements (caractéristiques intrinsèques des logements) et de ceux des salaires (caractéristiques des salariés), les aménités sont des déterminants importants de la qualité de la vie. Ainsi, on peut montrer que, dans les métropoles ensoleillées, les prix des logements sont, toutes choses égales par ailleurs, plus élevés et les salaires moins importants. A l'inverse, les variables climatiques qui décrivent des climats froids et pluvieux ou particulièrement chauds engendrent des prix du logement plus faibles et des salaires plus élevés, différentiels compensatoires pour vivre dans des lieux peu prisés. Si les aménités naturelles et climatiques jouent un rôle important dans les arbitrages inter-métropolitains, à l'échelle de la métropole, ce sont plutôt les aménités sociales, culturelles et récréatives qui définissent la qualité de vie.

Les aménités naturelles et climatiques jouent plus sur la croissance démographique que sur celle de l'emploi. Il en va de même pour les aménités reflétant les loisirs liés à l'eau. Par ailleurs, la croissance de la part de l'occupation forestière des sols accroît les migrations entrantes mais, quand cette part dépasse un certain seuil, l'effet est inverse et l'accroissement du couvert forestier joue comme une externalité négative. Enfin, les aménités associées aux sports d'hiver ont également des impacts forts sur la croissance démographique locale. Ces aménités peuvent donc jouer un rôle non négligeable dans les mobilités entre villes ou vers des espaces à haute valeur récréative et environnementale. Au-delà des actifs ayant ou recherchant un emploi, ces aménités naturelles et climatiques vont pour partie expliquer les migrations de retraités, dont la localisation résidentielle n'est plus déterminée par un lien à l'emploi mais plus fondamentalement par l'accessibilité aux services dont ils ont besoin.

De la même façon, ces aménités jouent un rôle essentiel dans le développement des zones touristiques, que cette activité économique soit diffuse ou fortement concentrée. Au-delà de l'implantation des installations récréatives dont ces espaces ont besoin, s'y développe une forme d'artificialisation des sols, peu couverte par la littérature scientifique, au travers des résidences secondaires, soit du fait de leur construction, soit du fait de l'augmentation de la pression foncière qu'elles entraînent. Celles-ci, au nombre de 3,3 millions en 2016 (soit 9,5 % de l'ensemble des logements), sont en plein développement, leur croissance (+ 0,8 %/an entre 1986 et 2016) étant cependant moins rapide que celle des résidences principales (+ 1,1 %/an sur la même période).¹⁷ L'emprise au sol de ce type de logements a donc dû augmenter de façon conséquente et devrait pouvoir être mieux pris en compte dans les analyses de l'artificialisation des sols.

Il existe donc des liens tangibles et potentiellement importants entre croissance (démographique et économique) locale et aménités qui peuvent alimenter des politiques de développement local appuyées sur les aménités.

Néanmoins, en modifiant l'équilibre spatial, le changement climatique en cours pourrait avoir des conséquences sur la distribution de la pression foncière. Aux Etats-Unis, les villes de la Rust Belt comme Cleveland, Detroit ou Pittsburgh pourraient redevenir attractives comparativement aux villes de la Sun Belt comme Phoenix ou Dallas si celles-ci deviennent exposées à de trop grandes chaleurs et périodes de sécheresse.

¹⁷ Arnold C. (2016). Le parc de logements en France au 1er janvier 2016. Insee Focus, No 73.

5.2.3. Les aménités françaises : un facteur d'attractivité internationale

La France se caractérise par une forte attirance de populations étrangères pour les aménités naturelles dont le soleil et la mer. Ces migrations "hédonistes" touchent au premier chef les populations à la retraite. Celles-ci ont pris de l'ampleur depuis les années 1990, résultat, entre autres, du vieillissement démographique, de l'enrichissement collectif et de la nouvelle mobilité interurbaine de la population active. L'ampleur de ces migrations hédonistes internationales est en partie tributaire de la géographie du pays. C'est ici que la France se démarque de la plupart des pays d'Europe où les variables géographiques sont des prédicteurs puissants de croissance urbaine.

L'effet de cette demande étrangère sur le développement de certaines zones mais aussi sur la pression foncière qui les caractérise est indiscutablement fort. La France attire, par ses aménités naturelles, des infrastructures de qualité et une métropole globale. Le *Wealth Report* reste à ce sujet une référence utile, notamment pour son *Prime International Residential Index* (PIRI), qui liste les 100 meilleures destinations pour l'investissement immobilier résidentiel de haute gamme. Pour l'année 2016, y figurent, pour prendre des exemples français : Val d'Isère, Cap-Ferrat, la Provence, la Gascogne et, bien entendu, Paris. À cela s'ajoutent les pressions exercées sur le sol par la demande touristique sous forme d'espaces hôteliers et récréotouristiques. Les investissements immobiliers de provenance étrangère, ainsi que les touristes et nouveaux résidents venus d'ailleurs contribuent, certes, par leurs dépenses locales à l'économie française et la revitalisation de certains territoires, mais accentuent également les pressions sur le marché immobilier français et la demande de terrains construits.

5.3. Politiques foncières et immobilières susceptibles de limiter l'extension urbaine et périurbaine

Les études portant sur les marchés fonciers et immobiliers révèlent la nécessité de distinguer leur ajustement tel qu'il s'observe au sein des villes monocentriques et à l'échelle de la couronne périurbaine, afin de mieux cerner les outils et leviers d'action susceptibles d'influencer les stratégies de localisation des ménages.

Les marchés fonciers et immobiliers s'ajustent en fonction des demandes de terrains et de logements exprimés par les ménages. Ils sont caractérisés par les règles suivantes :

- Les prix par unité de service résidentiel diminuent lorsque la distance au centre augmente ;
- La taille optimale du lot foncier augmente quand on s'éloigne du centre ;
- Les densités d'occupation du sol diminuent avec la distance au centre de la ville.

Quels sont les outils disponibles pour influencer la densité et la répartition spatiale des ménages ? Si le zonage et la fiscalité sont les réponses classiques (cf. Chapitre 8), d'autres outils tels que les marchés de droit à bâtir ou l'achat de foncier par les collectivités territoriales peuvent également être envisagés.

• Transfert de droit à bâtir

Le transfert de droit à bâtir est un outil économique susceptible d'influer sur les caractéristiques des marchés fonciers et immobiliers. Il permet au porteur de projet d'augmenter la densité sur une parcelle en achetant des droits non utilisés sur une autre parcelle de la même zone.

Dans les zones où des marchés de droits existent, les constructeurs sont limités dans leur choix de densité de construction par un seuil maximal. Ils peuvent éventuellement dépasser ce seuil en acquérant des unités de densité supplémentaire autorisée auprès d'un autre propriétaire foncier si ce dernier ne souhaite pas densifier sa parcelle à son seuil maximal. C'est le marché des coefficients d'occupation des sols (COS) tel qu'il a théoriquement existé sans être vraiment mis en pratique. L'efficacité de ce type de régulation en termes de limitation des constructions nouvelles dépend de plusieurs facteurs. En particulier, l'intensité de constructions supplémentaires à laquelle les constructeurs peuvent prétendre, doit être plus élevée que sous un schéma de régulation uniforme classique. La zone soumise à ce type de régulation doit correspondre aux attentes de la communauté locale, le seuil de limitation de densité doit être appliqué de manière stricte et le territoire ne doit pas présenter des zones non soumises à la régulation offrant ainsi aux constructeurs des opportunités alternatives de constructions nouvelles.

La mise en place d'un marché de droits de construction échangeables se heurte à la crainte de concentrer les activités dommageables (densité extrême en un lieu unique) ou la remise en cause de la réduction effective de la quantité totale de bâti, en comparaison avec un système de régulation uniforme plus classique. Pourtant, dans l'hypothèse vertueuse d'une répartition optimale des terres et une répartition des gains d'urbanisation, les transferts de droit à bâtir sont susceptibles, selon les économistes, de satisfaire l'intérêt général et l'intérêt privé.

En France, le recours à cet outil est négligeable : l'absence d'un marché suffisant pour fixer des prix cohérents, les contraintes législatives et le régime d'autorisation préalable mis en place expliquent en partie ce constat. Il pourrait peut-être se développer sous l'impulsion de la loi ALUR (2014) qui a créé un mécanisme de transfert de constructibilité dans les zones à protéger en raison de leurs paysages.

• Achats fonciers et projet de développement comme levier contre l'artificialisation des sols

Les politiques publiques peuvent agir directement sous la forme d'achats fonciers et de projets de développement. C'est le cas de la ceinture verte (*Green belt*) autour de Londres. Ces ceintures vertes (cf. Chapitres 4 et 8) existent dans plusieurs pays mais leur application au Royaume-Uni est originale puisqu'elles y sont décidées par l'agglomération et imposées aux communes. L'objectif britannique est ambitieux : limiter l'extension urbaine, réduire l'impact sur les zones agricoles, et éviter les déplacements périphériques en décourageant les implantations au-delà de la ceinture. Sur ce dernier aspect au moins, les résultats ne sont pas au rendez-vous et le bilan de cette politique est controversé dans la littérature.

Les effets attendus des ceintures vertes portent sur la restriction des constructions et de leur prix, l'amélioration des aménités environnementales sur le site et ses alentours et sur des effets de rareté de l'offre par rapport à la demande. Par ailleurs, une ceinture verte aurait pour effet de réduire sensiblement les effets des îlots de chaleur urbain, comme l'ont montré les modèles du CNRM simulant une ceinture verte autour de Paris. En France, certains travaux montrent que ces ceintures auraient un effet protecteur sur la zone visée et à proximité, tandis que l'attractivité est renforcée à une échelle plus large. Parallèlement, l'effet de rareté provoque une hausse des prix et modifie la demande en logements en la dirigeant vers d'autres lieux.

La revalorisation par le renouvellement urbain permet, de son côté, de maintenir et d'attirer la population dans les centres urbains. Cela peut se traduire par la réalisation de projets, la définition de zones de renouvellement ou des programmes de rénovation-renouvellement de l'habitat dans les quartiers défavorisés. La réalisation de grands projets publics (transports, espaces verts à l'intérieur des villes, projets favorisant le lien social, etc.) contribue à réorganiser les quartiers en incitant les constructeurs à concentrer leurs actions à proximité de ces nouvelles aménités plutôt qu'en périphérie. Potentiellement de grande ampleur, on observe qu'il est nécessaire pour les collectivités de disposer d'une bonne capacité de gestion administrative pour gérer ces projets.

La problématique des espaces vacants et de leur reconversion est logiquement au cœur de nombreuses stratégies urbaines.¹⁸ Bien que peu explorées par la littérature scientifique, les principales causes de la vacance sont la taille, la forme et la localisation des parcelles ainsi que le coût de la reconversion lié à la nature de l'usage antérieur (logements vétustes, implantations industrielles ou militaires...). Les mobilités résidentielles contribuent également à la vacance, tout comme la capacité géographique d'une ville à s'étendre. Le phénomène est en outre cumulatif : les logements vacants ou la présence de terres à l'abandon donnent un signal de délaissement qui peut conduire à terme à dégrader davantage les quartiers considérés. En cas de signe de déclin de certains quartiers ou, plus globalement, en cas de délaissement de la ville, une politique publique proactive permet d'anticiper ce phénomène pour mieux le contrebalancer, d'autant que la réhabilitation de quartiers dégradés accroît la valeur des biens immobiliers dans les quartiers voisins.

L'anticipation est un facteur clé et permet d'identifier les terrains susceptibles de constituer l'assise de nouveaux réseaux d'espaces de déplacement et d'espaces verts multifonctionnels. L'assemblage des espaces vacants, interstitiels (dents creuses) nécessite des politiques incitatives permettant aux propriétaires de coopérer, en accordant des capacités de densification plus fortes dans les espaces ciblés. Le cas échéant, ces politiques seraient complémentaires des actions menées par les établissements publics fonciers à travers l'exercice de leur droit de préemption.

En secteur urbain déjà dense, les exigences publiques (en termes de réseaux, de circulation, de qualité du bâti, etc.) sont fortes et la gestion de la complexité pèse sur les coûts. Ces obstacles sont amplifiés sur les friches industrielles par le besoin d'études environnementales, la recherche du responsable de la pollution, la durée du projet, etc.

Dans les espaces délaissés par les opérateurs privés, c'est aux pouvoirs publics d'assurer le renouvellement urbain. Si les politiques urbaines sont rarement en cause dans l'accroissement des espaces vacants, il convient en revanche de pratiquer des politiques incitatives à leur réappropriation. Dans le cas des villes en décroissance, ces espaces sont des opportunités pour moderniser la ville, inclure des nouvelles normes en matière environnementale et énergétique. Le choix du type de reconversion (espace vert, chemins, logements) doit être étudié avec attention en fonction du tissu et de la densité existante. Le bien-être des habitants est un levier important permettant de limiter l'augmentation des espaces vacants en milieu urbain.

Des dynamiques par "effets de substitution" émergent. Ainsi, en Ecosse, les ceintures vertes sont accompagnées de politiques de densification des espaces urbains, ciblées sur la reconversion des sites pollués. En France, les outils contractuels de type ZAC peuvent être utilisés pour forcer la reconversion d'espaces stratégiques dans les PLU, que le marché privé délaisse.

¹⁸ Il est très difficile de se faire une idée des surfaces artificialisées concernées par cette vacance. Elle concerne bien sûr le logement et on sait que le nombre de logements vacants a en France fortement augmenté, passant de 1,8 à 2,8 millions de logements entre 1986 et 2016 (C. Arnold, 2016, INSEE Focus, 73). Le bilan en matière de friches industrielles et d'immobiliers de bureau vacants reste à faire.

• La politique de transport : élément clé du développement compact des villes

La construction d'infrastructures de transports génère de l'étalement urbain, puisqu'elle permet d'habiter plus loin. En même temps, elle fluidifie le transport et, lorsqu'il s'agit de transport en commun, elle permet de rendre accessibles les centres urbains à un plus grand nombre de résidents, de réduire la pollution et la consommation énergétique globale.

La politique de transport vise souvent à créer des centres secondaires périurbains en tant que plateformes multimodales de transport ou nœuds de mobilité dont un des objectifs est de réduire la dispersion de l'habitat dans les couronnes périurbaines mais les résultats ne sont pas flagrants : bien qu'ils permettent une meilleure attractivité (notamment résidentielle) des sous-centres périurbains, la réduction de la dispersion du bâti n'est pas à la hauteur des attentes des décideurs. Certains auteurs préconisent l'application d'un *Transit Oriented Development* (TOD), consistant en une coordination des politiques de transports en commun avec les politiques d'aménagement afin d'augmenter l'usage des transports collectifs et d'encourager un développement plus compact des villes.

Alors que le fonctionnement des marchés tend à concentrer spatialement la localisation des entreprises dans le territoire, le déploiement d'infrastructures de transport peut induire de la dispersion dans la localisation de ces activités s'expliquant notamment par la diffusion améliorée des externalités de connaissances (cf. Chapitre 6).

5.4. L'importance économique et sociale du logement et de la construction

Au-delà du besoin en logements¹⁹, qu'il est nécessaire de garder en tête lorsque l'on cherche à limiter l'extension de l'artificialisation par l'habitat urbain et périurbain, il peut être utile de rappeler l'importance économique d'un secteur économique comme celui de la construction.

Le secteur de la construction est le premier secteur d'emploi en France (avec 1,3 million d'emplois). Mais, entre 2008 et 2015, ce secteur a perdu 152 000 emplois, sa production a baissé de 22 milliards d'€ (-18 %) et ses investissements de 2,5 milliards d'€ (-26 %), en grande partie en raison du fort recul d'investissement des ménages depuis 2008. A la suite de la crise de 2008, le nombre de logements neufs construits en France a considérablement reculé. Il est remonté en 2015 mais il ne semble pas couvrir encore la demande annuelle qui vient de l'augmentation de la population et du nombre de ménages (+25 % depuis les années 1990).

La demande en logement vient aussi du mal logement qui touche selon l'Insee 900 000 personnes. Cette situation n'est pas uniforme sur le territoire. Ce sont les zones les plus tendues qui n'ont pas su proposer des logements, provoquant indirectement une hausse du coût du logement sur ces territoires. Le mal logement engendre en outre des coûts directs importants, de l'ordre de 1,3 milliard d'euros pour pallier les situations de marginalisation (hébergement d'urgence). Les aides au logement s'élèvent à plus de 40 milliards en 2016. Les coûts indirects de prise en charge sociale sont également importants, estimés à plusieurs milliards.

Dans le cadre de cette expertise, l'impact sur l'emploi et la valeur ajoutée d'une hausse de l'investissement dans le secteur de la construction a été simulé à l'aide du modèle macroéconomique multisectoriel ThreeME²⁰. Les résultats obtenus montrent que, d'une part, le secteur de la construction contribue à la création d'emplois et à la croissance et que, d'autre part, la construction en zone périurbaine, dans les zones tendues, est à même de répondre aux besoins de logement des ménages et à participer à la baisse des prix immobiliers.

L'immobilier constitue en outre une part importante du patrimoine des français. Les terrains construits et les bâtiments qu'ils supportent représentent 86 % des actifs non financiers de la France, qui sont l'essentiel du patrimoine national, dont la valeur a été multipliée par 3,5 depuis 1990. La valeur des seuls terrains supportant des constructions a été multipliée par six entre fin 1997 et fin 2015 : elle représentait un demi-année de Produit intérieur net fin 1997 et s'élève, fin 2007, à 3,1 années de PIB. Au total, les actifs liés à l'urbanisation ont contribué à l'essentiel de l'enrichissement de la France depuis le début des années 1990. Cette contribution est principalement due à la progression des prix de marché auxquels est valorisé le stock de constructions et de terrains bâtis existants, mais les constructions sur des terres nouvelles au cours de la période ont également joué un rôle important. Au-delà de son impressionnante augmentation, ce capital immobilier équivaut, en somme, à un transfert de richesse au profit des propriétaires urbains, ce qui conduit Piketty (2013) à dire que le capital immobilier constitue aujourd'hui l'une des principales sources d'inégalité sociale en Occident, et plus particulièrement en France.

¹⁹ Selon les chiffres du MTES, en un an, d'octobre 2016 à septembre 2017, 496 900 logements (en données brutes cumulées sur douze mois) ont été autorisés à la construction et 414 000 logements ont été mis en chantier, soit une augmentation respective de 12,1 % et 17,6 % par rapport au cumul des douze mois précédents. Ces chiffres seront donc à mettre en regard avec le guide méthodologique sur la territorialisation des besoins en logement publié en février 2017 par le ministère du logement et de l'habitat durable.

²⁰ Le modèle ThreeME a été développé conjointement par l'OFCE et l'ADEME. Voir notamment « Les propriétés dynamiques et de long terme du modèle ThreeME », Revue de l'OFCE n°149, 2016.

Les données de Piketty nous font en outre comprendre que la valeur des sols construits (la contribution au capital national) ne découle pas uniquement des facteurs de demande sur lesquels nous nous sommes plus particulièrement penchés au cours de ce chapitre, mais aussi des facteurs d'offre, précisément parce que l'offre du sol est fixe. Or, devant des hausses soutenues de la demande, toute restriction à l'offre, aura nécessairement pour conséquence de faire augmenter les prix. Les études sur l'impact des règlements d'urbanisme et autres politiques de contrôle du sol ne manquent pas. De telles mesures peuvent s'avérer être des instruments efficaces pour freiner l'expansion des villes mais il faut garder en tête qu'elles se traduisent inévitablement par la hausse des valeurs foncières en ville et, en parallèle, des coûts de logement plus élevés. Toute rareté, réglementaire ou naturelle, crée une « rente » dont profitent, en l'occurrence, les propriétaires immobiliers.

5.5. Conclusion et leviers d'action

Les stratégies de localisation des ménages révèlent un arbitrage entre de nombreux paramètres qui se traduit par une extension urbaine et/ou une périurbanisation des ménages. Cette dernière, qui n'est pas nécessairement un processus subi, est, du fait du type de logements auxquels cherchent à accéder les ménages, une forte source d'artificialisation des sols au sein des vastes territoires qui sont aujourd'hui placés sous l'influence des villes. Limiter l'extension de l'artificialisation des sols, c'est autant contraindre l'extension des frontières de la ville que d'organiser efficacement son étalement dans les communes périurbaines. De ce constat, se dessinent des leviers pour les politiques publiques d'aménagement, œuvrant dans le sens d'une meilleure répartition sociale et d'une prise en compte accrue de la multifonctionnalité des villes. Les formes urbaines viennent ici nourrir fortement les réflexions en interrogeant les limites tant sociales qu'environnementales des modèles de ville compactes, laissant entrevoir une controverse sur les objectifs de densification. En revanche, la réhabilitation des espaces vacants, des friches industrielles au sein des espaces déjà urbanisés apparaît comme un levier efficace de réponse à la demande de logements et, de surcroît, vecteur d'externalités positives pour les quartiers alentours.

Pour les pouvoirs publics, les aménités peuvent être vues comme un levier de développement local, dont la complexité est toutefois démontrée par la littérature. En intra-urbain, on a vu que le développement d'aménités « naturelles » peut être un facteur d'attraction pour les populations résidentes, sachant que ces mêmes aménités sont aussi source de limitation des impacts environnementaux de l'artificialisation des sols. Les aménités naturelles sont également objet de développement d'activités touristiques qui, au-delà de leur rôle économique, pèse sur l'artificialisation des sols via le développement important des résidences secondaires et autres installations hôtelières touristiques.

Au final, l'enjeu pour les politiques publiques est d'être en mesure de relever un double défi : limiter les impacts environnementaux et l'extension spatiale de l'artificialisation liée à l'habitat, tout en répondant aux différentes formes de demandes en logement et aux exigences de lutte contre le mal logement.

6. Les déterminants de l'artificialisation des sols par les entreprises et les infrastructures de transport

Aux côtés de l'habitat, la localisation des entreprises et la construction des infrastructures de transport sont les deux autres facteurs d'artificialisation des sols en France. Selon Teruti-Lucas, les entreprises et infrastructures représentent la majorité des sols artificialisés (Figure 6-1). Ainsi, les activités industrielles, commerciales et de service public représentent, en 2014, 20 % des surfaces artificialisées (auxquels pourraient être ajoutés les 9,5 % de sols artificialisés liés à l'activité agricole), alors que les infrastructures de transport (routières et ferroviaires) en représentaient 28 %.

Le rythme de croissance des surfaces artificialisées entre 2006 et 2014 apparaît, selon Teruti-Lucas, moins fort pour ces activités que pour l'habitat (Figure 5-1). Néanmoins, dans une analyse comparative de 15 zones urbaines européennes, M. Kasanko *et al.* (2006)²¹ montre que, pour les trois villes françaises prises en compte (Lyon, Marseille et Grenoble), les surfaces non résidentielles ont augmenté plus rapidement que les surfaces résidentielles (Figure 6-2). En plus de Dublin et Palerme, on trouve deux autres villes où la croissance des surfaces résidentielles a été plus rapide : Héraklion en Grèce et Pordenone en Italie. Par ailleurs, l'accroissement de ce type d'artificialisation s'accompagne quasi systématiquement d'une complète imperméabilisation des sols, à l'inverse de ce qui se passe en matière d'habitat (Figure 5-1).

Utilisation des sols en France (1992-2008)

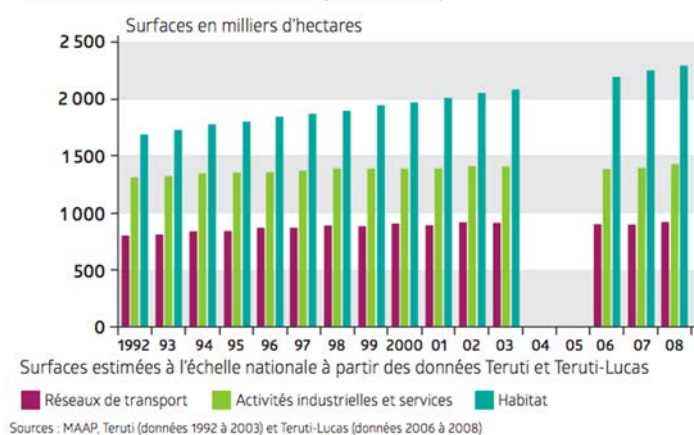


Figure 6-1. Le foncier économique, un tiers des surfaces artificialisées (source : Teruti-Lucas)

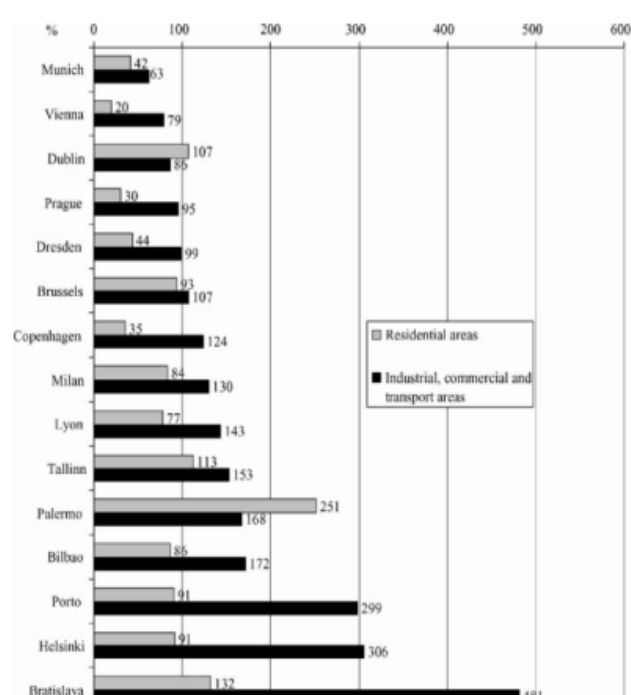


Figure 6-2. Taux de croissance des aires résidentielles et industrielles-commerciales et de transport entre le milieu des années 1950 et la fin des années 1990 (M. Kasanko *et al.*, 2006).

6.1. Les stratégies de localisation des entreprises et des industries

On observe, en Europe comme dans tous les pays industrialisés, une forte concentration des activités économiques dans et autour des grands centres urbains sur laquelle se sont penchées, depuis longtemps, l'économie spatiale, régionale et urbaine et la géographie économique. Cependant, comme on le verra plus loin, la littérature traitant des conséquences de ce phénomène sur l'emprise au sol des activités économiques et donc sur leur contribution à l'artificialisation des sols est étonnamment clairsemée en comparaison du poids que représentent les entreprises sur le total des surfaces artificialisées. Quelques travaux ont pu être repérés concernant des activités fortement consommatrices de surfaces comme les activités commerciales ou logistiques. Ces dernières apparaissant mieux documentées, on proposera dans ce qui suit une focalisation sur le développement des plateformes logistiques.

²¹ M. Kasanko *et al.* (2006) "Are European cities becoming dispersed?"

6.1.1. Economies d'échelle et économies d'agglomération, source de l'urbanisation et de la métropolisation

La recherche d'économies d'échelle dans la production, accentuées par le progrès technique, est à la base du processus de concentration de toute activité économique et donc des phénomènes d'urbanisation et de métropolisation. Mais, les économies d'échelle (ici, internes à la firme) ne sont pas seules responsables de l'agglomération continue des activités économiques. Au-delà de la croissance de la taille des firmes que les économies d'échelle, diverses formes d'économies dite d'agglomération ont été identifiées. Les relations marchandes, sur les marchés des biens et sur les marchés du travail, jouent un rôle non négligeable dans les choix de localisation des firmes. En raison des coûts de transport et des effets des formes de concurrence auxquelles elles font face, les firmes vont chercher à se localiser à proximité des marchés dont elles ont besoin tant en entrée qu'en sortie de leur processus de production. Elles vont donc tendre à s'agglomérer soit au plus près de leurs fournisseurs (marchés des biens intermédiaires), soit au plus près de leurs clients (marchés finaux), soit à proximité des deux en même temps. Parallèlement, et en même qu'elles tendent à attirer à elles des travailleurs à la recherche d'un emploi, les firmes vont chercher à accéder à un marché du travail assez vaste pour recruter la main-d'œuvre dont elles ont besoin et donc s'implanter à proximité d'agglomération de populations. La baisse des coûts de transport, en particulier avec les révolutions des chemins de fer et des navires à vapeur, aurait pu remettre en cause ces mécanismes. En fait, cette baisse pèse peu sur les marchés du travail et elle a permis d'élargir les aires de marché.

En sus des rendements croissants internes aux entreprises et des économies d'agglomération qui passent par les marchés, l'existence de rendements croissants externes aux firmes est également source d'agglomération. Ces externalités combinent plusieurs dimensions, celles résultant de services aux entreprises nombreux et hautement spécialisés, d'une main-d'œuvre spécialisée permettant un bon appariement de l'offre et de la demande sur le marché du travail et, enfin, de l'émergence et de la diffusion d'idées nouvelles, permise par la proximité, source d'innovations lorsqu'il s'agit d'échanger des informations en « face-à-face ». Ces économies d'agglomération peuvent se diviser en deux classes : celles réalisées grâce à la co-localisation avec d'autres entreprises ou institutions dans des domaines similaires ou connexes, communément appelées "économies de localisation"; celles réalisées grâce à la localisation dans une grande ville, appelées "économies d'urbanisation". Les économies de localisation propres au secteur d'activité auquel appartient l'industrie, poussent, à titre d'exemple, l'industrie aéronautique à se regrouper dans des villes particulières. En France, ce n'est pas à Paris que se trouve la plus importante concentration de l'industrie aéronautique, mais à Toulouse. L'industrie pharmaceutique à Lyon est un autre exemple d'une industrie dont la concentration est surtout motivée par des économies de localisation, dont la présence d'un bassin de main-d'œuvre spécialisée et expérimentée et des institutions de formation et de recherche. Cette distinction en deux catégories des économies d'agglomération a été revisitée plus récemment pour en faire ressortir plus spécifiquement les bases microéconomiques et donc le lien avec le rôle que jouent dans l'agglomération les relations que les entreprises nouent entre elles sur les marchés. Trois types de mécanismes sont aujourd'hui distingués portant sur l'ensemble des marchés (du travail, des biens intermédiaires et des biens finaux). Ils sont considérés comme décisifs pour apprécier ce dont bénéficient les entreprises lorsqu'elles se localisent dans les zones agglomérées : le partage (*sharing*) qui renvoie au partage de biens indivisibles et des bénéfices de la diversité, l'adéquation de l'offre et de la demande qui augmente avec l'augmentation du nombre de personnes (*matching*) et l'apprentissage (*learning*) et l'innovation qui concernent la création et la diffusion de connaissances. La façon dont chaque secteur d'activité mobilise l'une ou l'autre de ces dimensions permet de comprendre sa plus ou moins grande dépendance au centre et sa plus ou moins grande propension à s'en éloigner.

Au-delà des débats et des travaux qui se poursuivent pour identifier les poids relatifs à attribuer à ces différents facteurs, leur évolution dans le temps et leur pérennité, ces différents mécanismes se sont traduits par le mouvement de métropolisation, que l'on connaît et qui repose sur la lame de fond de la mondialisation et sur la puissance des économies d'agglomération et la contraction de « l'espace-temps ». Celui-ci se produit partout dans le monde, dessinant une concentration relative des formes sociales et productives innovantes dans les plus grandes villes. Les métropoles sont les principaux moteurs du développement économique, scientifique et social. En France, ces mécanismes sont responsables d'un rééquilibrage géographique, marqué par la croissance de ses principales métropoles régionales, articulées et coordonnées avec Paris, qui maintient son statut de ville globale. Ainsi, en 2012, l'Île-de-France, qui recouvre à peine 2 % du territoire métropolitain de la France, regroupait 19 % de la population française et produisait 30 % du PIB de la Nation. Cette concentration géographique de l'industrie, accompagnée d'une politique fiscale, a facilité la croissance économique qui a permis, au-delà d'un certain seuil, une redistribution des revenus vers le plus grand nombre, ainsi que le financement d'une palette de services publics qui ont contribué en France, et plus généralement en Europe occidentale, à une augmentation importante du niveau de vie des ménages.

Rien ne laisse entrevoir un affaiblissement des économies d'agglomération pour la grande majorité des branches d'activité. Dans aucun des pays dans lesquels émergent des sociétés et des « villes post-industrielles », on observe un recul dans les niveaux d'urbanisation. Ainsi, en France comme ailleurs, la croissance future de l'emploi continuera à se faire très majoritairement dans des zones urbaines métropolitaines. Ainsi, l'arrivée des Technologies de l'information et de la communication (NTIC) n'a pas eu d'impact visible sur la déconcentration des activités économiques et des populations des villes. Les activités les plus friandes d'information (finances, média, grands bureaux...) continuent à se concentrer dans les grandes métropoles.

Centralisation (de la production) et baisses de coûts de transport sont deux faces de la même médaille. Pour que la production en série soit rentable encore faut-il que le producteur puisse livrer le produit aux clients à un coût raisonnable. On comprendra facilement que la construction d'autoroutes, l'arrivée du transport frigorifique et d'autres innovations en matière de logistique étaient des préalables à l'aménagement de Rungis. Le même raisonnement s'applique aux services, à la seule différence qu'il s'agit aujourd'hui de transport de l'information. À l'échelle des pays, l'effet des NTIC, comme les innovations naguère en matière de transports, va plutôt dans le sens du renforcement des forces d'agglomération.

A la petite échelle, les transports et les nouvelles technologies de la communication, loin de contribuer à la dispersion des activités par la baisse des coûts de transport, contribuent au contraire au renforcement des effets de polarisation. En effet, les transports comme les TIC reposent sur une logique de massification des flux afin de mettre en œuvre les économies d'échelle propre aux transports (avions gros porteurs ou navires géants). Cette massification suppose la concentration des flux grâce à des hubs qui s'apparentent à de vastes pompes aspirantes et refoulantes. Ce sont dans les plus grandes métropoles mondiales que se situent aussi les plus grands aéroports et les plus grands ports maritimes mondiaux qui jouent ce rôle de hubs. Ainsi, à l'échelle mondiale, une petite centaine de villes qui ne regroupent qu'un cinquième de la population urbaine mondiale concentrent à elles seules près de 45% des trafics passagers aériens, 70% des trafics fret aéroportuaires et 70% des conteneurs maritimes manutentionnés dans le monde !

De même, la colonne vertébrale d'internet se situe au fond des mers grâce à près de 300 câbles sous-marins qui pour les plus puissants sont capables d'assurer des dizaines de millions de connexions simultanées. Leur géographie à l'échelle mondiale s'organise en grands axes Est-Ouest entre les pôles de l'économie mondiale, liaisons Nord-Sud plus secondaires et liaisons Sud-Sud encore quasi inexistantes. Ce sont d'abord les grandes villes littorales mondiales qui sont reliées entre elles, accentuant encore les effets de polarisation.

6.1.2. Répartition des activités au sein de l'armature urbaine et des aires urbaines

- La dynamique de concentration-expulsion appliquée à l'échelle urbaine

La concentration croissante des activités les plus intensives en matière grise, souvent aussi les mieux rémunérées, dans les plus grandes métropoles a pour effet d'y faire augmenter les salaires et les prix du sol, si bien que des entreprises faisant une utilisation plus extensive du sol et n'ayant pas forcément besoin d'une main-d'œuvre hautement qualifiée trouveront avantage à se localiser dans des villes plus petites ou des espaces peu denses. Cette dernière dynamique s'applique surtout aux industries manufacturières centrées sur des produits standards.

La dynamique de concentration-expulsion s'applique aussi à l'échelle de l'aire urbaine, à la différence près que c'est la logique foncière et non les salaires (ou autres conditions locales) qui inciteront surtout les entreprises à se décentraliser. En effet, l'attribut premier d'une aire urbaine est de constituer un marché du travail intégré. Ce sont les flux résidence-travail qui définissent le périmètre de l'agglomération, plus ou moins étendue selon la facilité des déplacements.

Il faut distinguer les causes de la croissance urbaine des causes de l'étalement urbain. Les innovations en matière de transports et communications facilitent la concentration de l'activité économique à l'échelle des pays et des continents, mais facilitent aussi l'émergence de villes plus étendues. Les réseaux de transport, principalement via les réseaux autoroutiers radioconcentriques et en radiales, permettent une très forte accessibilité à l'échelle de l'aire urbaine avec de faibles temps de parcours et pour un coût modique. Ils permettent ainsi aux habitants ou aux entreprises de s'affranchir des coûts fonciers élevés qui caractérisent les centres urbains pour des localisations dans les périphéries. Rungis sert d'exemple utile. Les innovations en matière de transports et communications ont facilité la concentration de la distribution alimentaire en région parisienne, mais ont également facilité sa déconcentration à l'intérieur de la région parisienne, région qui, de ce fait, s'est étendue. L'effet net de cette double dynamique de concentration-déconcentration sur la demande globale de sols construits ne se mesure pas facilement.

Un nombre croissant de bourgs et villes secondaires s'inscrivent dans des systèmes métropolitains régionaux. Les conséquences de cette évolution sont à la fois un éclatement des systèmes résidentiels et une recomposition spatiale des systèmes productifs : à l'échelle des villes et des territoires, les distances – y compris longues – sont de moins en moins un frein pour les échanges quotidiens, la multi-localisation des activités et des personnes se développe, les frontières des villes ne disparaissent pas mais changent de nature – elles traversent plus les territoires en interne qu'elles ne les délimitent.

Les entreprises jouent un rôle majeur dans cette recomposition. Tout en consommant du foncier (Figure 6-1), elles structurent par leur localisation un grand nombre d'autres choix de localisation : l'émergence des *edge cities* (villes-lisières) aux Etats-Unis par exemple, conduit à ce que l'étalement se fasse non plus autour du centre-ville mais à partir des centres secondaires, nés du redéploiement des activités économiques.

• L'étalement urbain et périurbain des activités économiques

L'étalement des populations à l'échelle de la ville s'est également accompagné d'un étalement des emplois. Le rythme de croissance des emplois est aujourd'hui nettement plus marqué dans les parties périphériques et périurbaines des grandes aires urbaines qu'au sein des centres des grands pôles urbains eux-mêmes (Figure 6-3), et ce quelle que soit le pôle urbain considéré (Figure 6-4).

Si les emplois restent moins décentralisés que les populations, la "dédensification" des centres d'emploi est un phénomène majeur des dernières décennies. Les études montrent également qu'une forte corrélation existe entre le gradient de la densité des emplois et celui de la densité des populations.

Cette évolution s'explique par une croissance plus forte en périphérie. Ainsi, aux Etats-Unis, la majorité de la croissance de l'emploi entre 1985 et 1995 a bénéficié aux zones rurales et la compétition entre la banlieue lointaine (*outersuburbs*), le périurbain (*exurban*) et les espaces ruraux (*rural areas*) serait même plus pertinente à étudier que la compétition entre Centres et Périphérie, le résultat de cette dernière étant une évidence.

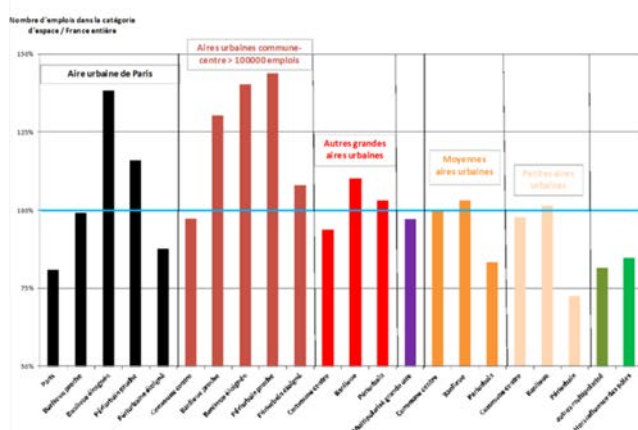


Figure 6-3. Evolution relative de 1982 à 2008 des emplois selon le gradient centre-périphérie (Sénat, 2012, INSEE)

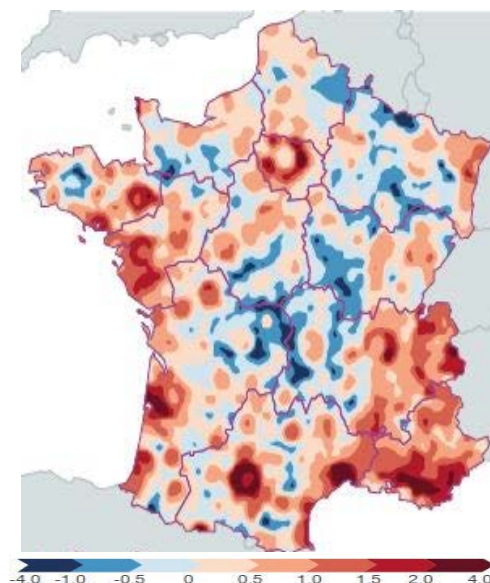


Figure 6-4. Taux de variation annuel de l'emploi entre 1975 et 2012. Source : CGET, 2016

• Métropoles polycentriques ou systèmes régionaux : deux types de recomposition pour l'emploi autour des métropoles

La dynamique des marchés fonciers à l'intérieur de la ville peut conduire les entreprises à choisir de s'installer en périphérie pour bénéficier d'un foncier moins cher sans pour autant dégrader leur accès aux salariés et aux consommateurs. L'élément décisif dans ce cas est la synchronisation des décisions d'acteurs économiques de départ vers la périphérie, puisque c'est cela qui garantira aux entreprises qui déménagent qu'elles préserveront leur accès aux marchés locaux. Cela souligne le rôle des méso-acteurs (à l'échelle d'un secteur d'activité) dans cette synchronisation. Par contre, le déplacement de l'emploi en banlieue ou en périurbain peut allonger considérablement le temps de transport quotidien des travailleurs selon l'accessibilité des zones.

Les études montrent aussi que l'ajout d'une infrastructure éloignée du centre – de type rocade – contribue largement à l'augmentation continue de la consommation foncière à destination économique.

La croissance de centres métropolitains finit par rattraper les bourgs et villes moyennes environnants pour les inscrire dans un système régional intégré. Ces dynamiques trouvent peu de traductions dans les politiques publiques : les logiques intercommunales restent cantonnées aux communes contigües du pôle urbain et les "pôles métropolitains" favorisent pour la plupart les relations entre grandes métropoles. Hormis les SCOT, il n'y a pas de dispositif simple permettant à une grande métropole d'entretenir des espaces de dialogue avec les villes moyennes de sa périphérie. C'est l'esprit des Conférences Territoriales de l'Action Publique, créées par la loi MAPTAM, mais cette logique n'est pas encore réellement opérationnelle. Les espaces périurbains et les franges urbaines restent des territoires en devenir pour les premiers, des fronts pionniers pour les seconds. Les projets d'aménagement y restent en grande partie à inventer pour faire aussi de ces espaces des territoires de projet.

Encadré 6-1 - L'exemple de l'Oise

La principale difficulté pour les pouvoirs publics qui chercheraient à agir sur cette dynamique d'augmentation de la consommation foncière en périphérie est qu'elle se produit le plus souvent dans les interstices des maillages administratifs : l'Oise subit ainsi directement et de longue date les effets de la présence à ses portes de la région parisienne, sans pour autant bénéficier des effets "protecteurs" pour son foncier d'un schéma d'aménagement très protecteur comme celui de la région parisienne : localisée dans la région des Hauts de France (et avant cela en Picardie), l'Oise n'a jamais été concernée par le Schéma Directeur de la Région Ile-de-France alors que certaines communes sont à moins de 50 km de Paris. Ce constat (que l'on retrouve aussi autour de Genève) appelle à plus de coopérations transfrontalières entre les collectivités.

• La préservation des aménités : un argument attractif pour les entreprises

Dans la littérature appliquée, il est rare de supposer que les aménités aient des effets directs sur les entreprises et les entrepreneurs. Cela vient du fait que les aménités n'affectent généralement pas directement leur production, sauf pour les secteurs récréatifs, très grands consommateurs d'espaces artificialisés (6,67 % des surfaces artificialisées). En revanche, elles peuvent avoir des effets indirects via le prix du foncier, les salaires et l'abondance de main d'œuvre qualifiée. Les économies d'agglomérations jouent un rôle fondamental dans la localisation des entreprises de services et de haute-technologie où elles sont particulièrement importantes. Pour des villes de même taille, offrant les mêmes économies d'agglomération, les aménités peuvent avoir un rôle dans la croissance dans la mesure où elles permettent d'attirer la main-d'œuvre qualifiée. Elles pourront offrir des salaires plus faibles mais devront acquitter des loyers plus élevés. Les aménités résidentielles jouent donc un rôle dans l'attractivité des régions pour les entreprises et ont un impact sur l'artificialisation des sols.

Les politiques d'attractivité des entreprises qui se fondent sur les aménités peuvent espérer attirer des entrepreneurs et inventeurs mobiles. Toutefois, le rôle déterminant des économies d'agglomération et des facteurs de production spécifiques rend complexe la mise en œuvre de telles politiques. Des études montrent que les aménités jouent sur l'attractivité de la main d'œuvre qualifiée surtout dans les villes moyennes, mais pas de manière décisive dans les grandes villes où les économies d'agglomération sont largement prépondérantes et ni en zone rurale où, au contraire, elles sont trop faibles pour être compensées par des aménités. Les aménités peuvent en revanche jouer un rôle d'accompagnement. En attirant de la main-d'œuvre, notamment de la main-d'œuvre qualifiée, elles peuvent faciliter l'installation d'entreprises. Dans les zones denses où les économies d'agglomérations sont importantes, lutter contre les externalités négatives liées à la densité (congestion, délinquance, pollution de l'air, disparition des espaces naturels) peut s'avérer un complément aux politiques économiques d'attractivité.

• Les conséquences foncières des logiques de localisation des entreprises : une lacune de la littérature

Aucun des processus évoqués précédemment qui se traduisent par un choix d'implantation géographique des entreprises ne fait explicitement référence au foncier comme si les entreprises concernées ne mobilisaient pas de foncier pour y installer les bâtiments dont elles ont besoin et leurs dépendances. Le foncier pourrait/devrait ici, comme pour les ménages, jouer comme une force de dispersion des activités économiques et entrer explicitement dans les termes de l'arbitrage de localisation des firmes. Pour comprendre cette absence, il faut prendre conscience du fait que, contrairement à ce qui se passe pour les ménages, le coût du foncier peut considérer comme négligeable dans l'arbitrage de localisation des firmes, au regard du poids que représentent l'ensemble des gains que les firmes ont à s'agglomérer du fait de la force des économies d'agglomération. Ainsi, sauf dans le cas d'activités fortement consommatrice de foncier comme les plateformes logistiques, tant l'économie spatiale, régionale et urbaine que la géographie économique, ne sont pas en mesure aujourd'hui de documenter la question de l'emprise au sol des activités économiques et de ses déterminants, et ce en dépit du poids qu'elles représentent dans l'artificialisation des sols.

Il y a cependant un lien direct entre la dynamique des entreprises, leur spécialisation sectorielle/fonctionnelle et leur distance de localisation dans l'aire métropolitaine, avec une conséquence directe de la réorganisation (ou de la multilocalisation) sur la consommation de foncier. De ce point de vue, l'externalisation massive des activités et la segmentation de plus en plus fine des secteurs et branches se traduit par une complexification des dynamiques foncières. La spécialisation des pôles périphériques les rend plus sensibles aux cycles économiques sectoriels et aux modèles d'organisation productifs. Cela rend potentiellement plus instable la demande de foncier en périphérie qu'au centre. Le développement d'une ville se traduisant par une croissance différenciée des différentes activités de la ville, les différents quartiers de la ville sont susceptibles d'avoir des dynamiques de croissance différentes : alors que le centre aura une demande foncière relativement stable, seulement sensible à la conjoncture globale de la ville, chaque zone périphérique peut faire face à de très fortes variations en fonction de conjonctures sectorielles locales. La conséquence est qu'une zone périphérique pourra s'avérer sous tension et être artificialisée alors qu'au même moment de l'autre côté de la ville certaines zones sont vides... et la même zone à peine artificialisée pourra subir un contrecoup économique qui la verra tourner en friche à peine inaugurée.

6.1.3. La dynamique d'implantation des plateformes logistiques, l'exemple d'un secteur fort consommateur de surfaces

Le transport des marchandises et la logistique ont connu un développement rapide dans les territoires métropolitains, repérable à de multiples indicateurs dont l'un des plus significatifs est celui du nombre d'entrepôts et, plus généralement, de bâtiments dédiés aux fonctions logistiques. Derrière la problématique de la localisation et de la taille de ces entrepôts, il faut garder à l'esprit que les surfaces artificialisées engendrées par leur implantation s'étendent au-delà de leur seule occupation du sol (parkings et voies d'accès).

Les entrepôts sont encore en majorité installés de façon isolée ou au sein de parcs d'activités à vocation multiple, mais des *clusters* d'entrepôts font désormais partie du paysage de l'immobilier logistique. Une *plateforme logistique* est spatialement délimitée et généralement enclose. Ces parcs réduisent les nuisances liées au système logistique des régions qu'ils servent, notamment parce qu'ils favorisent une relocalisation des entreprises de transport et logistique sur un lieu unique, minimisant ainsi le mitage logistique. Le récent *Atlas des entrepôts et des aires logistiques* en France en 2015 du Ministère de l'environnement identifie des "aires logistiques", dont des "aires logistiques denses" et les différencie des "entrepôts isolés" de la façon suivante :

- Une *aire logistique* est un territoire composé d'au moins trois entrepôts ou plateformes logistiques (EPL) de plus de 5 000 m² et sur lequel chaque EPL est localisé à moins de six kilomètres d'un autre EPL de la même aire logistique. Ces aires accueillent 81 % des EPL de plus de 5 000 m² et se situent autour des grandes agglomérations françaises. Les trois aires logistiques étendues situées autour de Paris, Lille et Lyon comptabilisent 23 % des EPL de plus de 5 000 m².
- Au total, 19 % des EPL se situent sur des territoires avec une offre logistique peu dense. Ces EPL dits "isolés" sont, pour près de la moitié d'entre eux (46 %), exploités par des industriels et sont en moyenne plus petits (15 800 m²). Ils se situent pour 36 % dans des zones rurales et pour 20 % dans des unités urbaines de moins de 2 000 habitants.

L'implantation des entrepôts logistiques a fortement évolué et répond à des déterminants en lien avec les formes urbaines. L'étalement logistique observé appelle à une prise en compte *ad hoc* de ce phénomène par les documents de planification.

• Déterminants de l'implantation des entrepôts

Trois facteurs expliquent la hausse du nombre d'entrepôts dans les grandes villes : (i) l'externalisation de la logistique ; (ii) la mondialisation des échanges ; (iii) le développement de nouvelles consommations urbaines. Par exemple, les marchés du commerce électronique offrent des services nouveaux comme la livraison le jour même, nécessitant des entrepôts à proximité des grandes agglomérations. Ces fonctions logistiques dynamiques des grandes métropoles se concrétisent dans des bâtiments, les entrepôts, où vont être préparés les envois de marchandises.

Beaucoup de ces entrepôts modernes sont de grande taille et nécessitent un appareillage important (automatisation, circuits d'information). Les "méga-centres de distribution" qui atteignent de 50 000 à 150 000 m² se sont développés à partir des années 2000. La manière dont ces installations logistiques sont localisées et aménagées contribue à l'efficacité de la distribution des biens, sans doute davantage que l'organisation *stricto sensu* de leur transport, dont les coûts ont diminué de façon spectaculaire au cours des trente dernières années, jusqu'à devenir "quasiment insignifiants". La prolifération et l'expansion des entrepôts et leur prédilection pour des zones suburbaines facilement accessibles sont le fait de l'intensification des liens de longue distance entre des économies de pays éloignés.

• Evolution de l'implantation des entrepôts logistiques : Plateformisation et éparpillement des terminaux logistiques

La montée en puissance des "hypercentres logistiques", localisés généralement sur les interfaces autoroutières, aéroportuaires ou ferroviaires, a contribué fortement à l'émergence de pôles secondaires spécialisés dans les secondes couronnes des grandes agglomérations, et notamment en Ile-de-France. Un grand nombre de terminaux logistiques se dispersent sur une grande partie du territoire métropolitain. Par exemple, 645 communes franciliennes (sur les 1281 que compte la région) accueillent des espaces logistiques : 24 d'entre elles concentrent 42% des surfaces utiles, ce qui dénote une forte concentration sur un nombre limité de communes, et à l'inverse 621 communes accueillent 58% des surfaces, ce qui est là un signe d'étalement.

Les centres de distribution de la grande distribution en Ile-de-France étaient en majorité des équipements isolés ou mêlés à des activités autres que la logistique. Très peu de ces plateformes sont en fait regroupées avec d'autres établissements logistiques. C'est ce paysage fragmenté mais d'où émergent des concentrations puissantes d'activités logistiques auquel doivent réagir les municipalités franciliennes.

Entre la fin des années 1990 et aujourd'hui, la croissance du nombre d'établissements et encore davantage du nombre de mètres carrés pour les pays industrialisés, a dépassé 50 % et a pu atteindre 200 % (Encadré 6-2). Cette augmentation s'est particulièrement manifestée dans les grandes villes, démontrant une polarisation métropolitaine des fonctions logistiques.

Dans le bassin parisien (Figure 6-5), la distance moyenne au barycentre des entrepôts est passée de 155 km en 2000 à 110 km en 2012, en se resserrant autour de l'agglomération parisienne. Au sein de l'agglomération parisienne, ces établissements ont parallèlement connu des phénomènes d'étalement.

Encadré 6-2 - Les entrepôts d'Amazon à Los Angeles

Amazon a participé à la croissance métropolitaine des entrepôts aux États-Unis, notamment aux franges des grandes villes. A Los Angeles, trois grands centres de distribution ont été construits depuis 2012 pour desservir Los Angeles, auparavant approvisionnée à partir de l'Arizona. Ils sont situés à environ 110 km du centre-ville (City Hall). Ces entrepôts à San Bernardino, Moreno Valley et Redlands ont des tailles de 90 000, 110 000 et 65 000 m².

Les services de livraison instantanée (livraison en deux heures) sont également en développement et 5 entrepôts urbains existent aujourd'hui dans le tissu dense de Los Angeles. A Atlanta et Los Angeles, chacune des deux villes a enregistré sur son territoire, au cours des années 2000, un triplement du nombre d'établissements classés comme entrepôts.

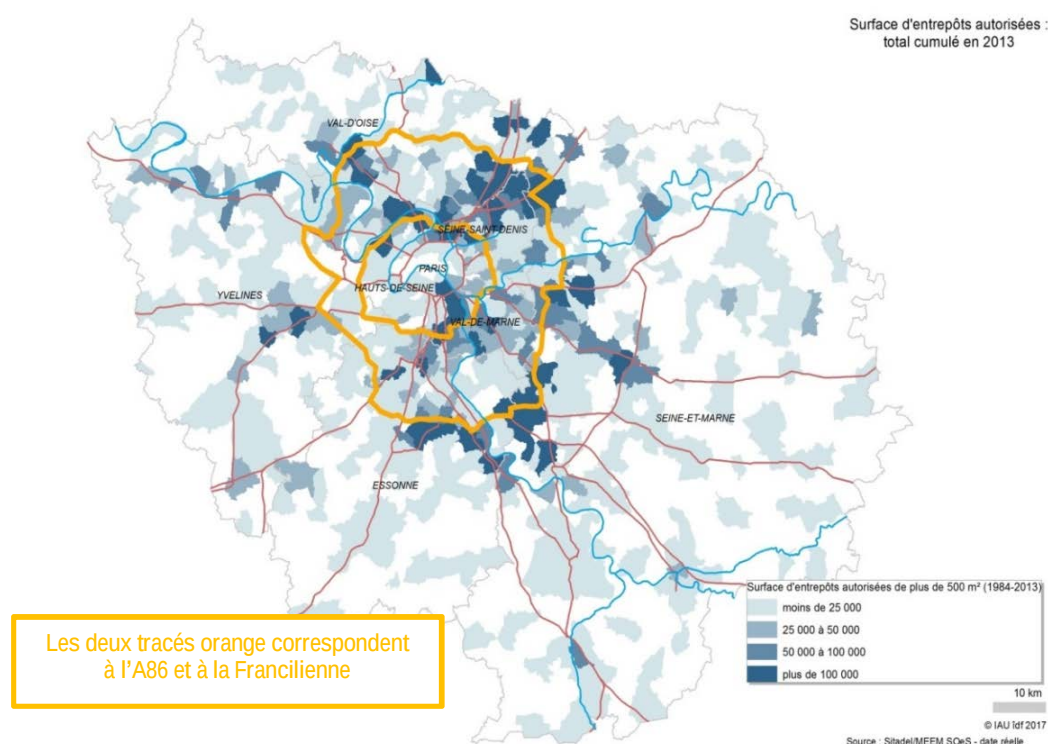


Figure 6-5. Constructions d'entrepôts en Ile-de-France, 1984-2013. Source : avec l'aimable autorisation de Corinne Ropital, IAU

Tous les jours, pour servir 700 000 établissements, 12 millions d'habitants et sa fonction de hub logistique national, 800 000 livraisons et enlèvements de marchandises sont nécessaires en Ile-de-France. La région concentre par ailleurs 20 millions de mètres carrés de surface utile d'entrepôts, représentant un quart du parc immobilier français. Ce parc logistique francilien a augmenté à un rythme accéléré dans la période récente : entre 2001 et 2009, le nombre total de mètres carrés d'entrepôts a crû de 50 %. Cette croissance relativement plus importante des fonctions logistiques dans les grandes régions urbaines s'explique par les besoins de l'économie de ces territoires. Les régions urbaines offrent "un marché local important pour les services logistiques, une proximité des nœuds des réseaux d'infrastructures, un marché du travail abondant et un marché immobilier professionnel actif" (Savy, 2006).

• Etalement logistique

Si, traditionnellement, les entrepôts se trouvaient aux franges de l'agglomération dense, voire en leur cœur lorsqu'ils étaient liés aux réseaux ferroviaires, ils se sont déplacés en zones suburbaines et périurbaines et rapprochés des réseaux et nœuds autoroutiers et des grands hubs intermodaux, notamment aéroportuaires (et beaucoup moins des ports fluviaux ou des terminaux ferroviaires dans des pays comme la France). Ces localisations offrent du foncier ou des locations immobilières à bas prix, d'autant plus nécessaires que la tendance est aux bâtiments de très grande surface. Une localisation périphérique offre davantage d'opportunités de parcelles grandes et plates, l'horizontalité étant devenue aujourd'hui un atout très important pour la construction des entrepôts, en raison notamment des contraintes d'installation des automatismes de stockage et picking (regroupement des colis à livrer) au sein des entrepôts.

En théorie, cet éloignement pourrait réduire la distance nette totale parcourue par les camions, puisque les destinations à livrer (entreprises et ménages) sont, pour une part, également éloignées des centres. Cependant, la dispersion des plates-formes logistiques est de plus grande ampleur que celle des autres activités. On peut ainsi considérer qu'il y a eu, globalement, augmentation des distances à parcourir pour livrer des marchandises dans la zone dense francilienne mais l'économie de coût foncier et les gains d'efficacité permis par une localisation en périphérie ont largement compensé, pour les décideurs des nouvelles localisations, le surcroît de coût de transport. En revanche, cette optimisation entraîne un effet de mitage, avec un effet direct sur l'artificialisation des sols et la transformation des paysages.

Encadré 6-3 - Vers des espaces verticaux en centre-ville

Au Japon, les municipalités acceptent des bâtiments logistiques de très grande surface ramassés sur plusieurs étages. Prologis a ainsi construit au cœur de Tokyo des bâtiments logistiques de plus de sept étages à proximité immédiate d'immeubles résidentiels et de centres commerciaux. En France, la société Sogaris s'est spécialisée dans la logistique urbaine.

Le retour en zone dense des activités logistiques permet de limiter les derniers kilomètres de la livraison, de massifier des flux d'approche (et donc limitant les véhicules-kilomètres totaux) et de **réduire l'empreinte foncière de la logistique**. La ville de Paris a ainsi mis en place une politique de retour au centre des entrepôts. Elle a, d'une part, activement soutenu la création d'espaces logistiques urbains dans les quartiers centraux et a, d'autre part, réservé dans son PLU (2016) des zones devant à l'avenir accueillir des fonctions logistiques, si possible avec pénétration ferroviaire ou fluviale dans la zone dense.

La Région Ile-de-France a, de son côté, fait des études pour identifier les emprises logistiques potentiellement mobilisables en zone dense et les outils fonciers et juridiques à sa disposition. Les documents de planification régionale (le SDRIF de 2013, le Plan de déplacement urbain de 2014) portent partiellement des objectifs de recentralisation de la fonction logistique. Cependant, compte tenu du contexte de prix bas du transport, de la pression foncière en ville globalement défavorable aux activités logistiques, il faut s'attendre à la poursuite d'un développement périurbain de bâtiments logistiques.

• Planification de la logistique

Le choix final de localisation de plateformes logistiques résulte d'une relation bilatérale parfois très déséquilibrée entre un promoteur logistique et une commune. Tentant de réguler ce processus, la France a été l'un des premiers pays européens à généraliser la prise en compte des marchandises dans les documents d'aménagement urbain, mais il a fallu attendre la loi NOTRe en 2016 pour que soit créé le SRADDET (schéma régional d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires). Elaboré à l'échelle régionale, ce document de planification est fondé sur le modèle de ce qu'a été le SDRIF en Ile-de-France depuis plusieurs décennies (1965). Il a pour but de structurer le territoire régional en polarisant les activités autour d'une vingtaine de sites d'accueil, bien répartis sur l'ensemble de la région.

Cependant, des freins institutionnels et constitutionnels sont à l'œuvre, dans la mesure où la Région ne dispose pas des compétences juridiques pour contraindre directement les plans locaux d'urbanisme. Par conséquent, aucun des schémas directeurs passés n'a pu influencer significativement la localisation des entrepôts et plateformes en Ile-de-France. Des leviers existent pourtant et l'Etat pourrait jouer un rôle significatif, ne serait-ce que par son pouvoir de contrôle des permis de construire. En outre, la plupart des entrepôts logistiques sont soumis au régime des installations classées, placé sous l'autorité de l'Etat. Par ce biais, une introduction de cette problématique dans les textes réglementaires pourrait avoir un impact significatif sur la délivrance des autorisations et ainsi influencer sur la structuration de la carte régionale des terminaux logistiques, dans le sens d'un meilleur regroupement.

6.2. Les infrastructures de transport en France

D'après le Service d'observation et des statistiques du ministère de l'écologie (SOES 2016), l'emprise au sol des réseaux ferrés et routiers représentait en 2012 (dernière date connue) 20 970 km², soit 3,8 % du territoire métropolitain. Cette estimation s'approche de la moyenne européenne qui dépasse les 3 % d'occupation des sols des Etats membres (EEA 2005). La France métropolitaine (Corse exclue) bénéficie ainsi du réseau routier le plus important d'Europe en cumulant 1,073 millions de km linéaires (contre 644 pour l'Allemagne qui occupe la deuxième place) (SOES 2016).

La route contribue de façon majoritaire à l'occupation des sols par les infrastructures de transport avec 1 230 000 ha, ce qui équivaut approximativement à la surface de la région Ile-de-France. Les lignes ferroviaires occupent la seconde place avec 867 000 ha de surface au sol, dont la majeure part sont des sols perméables. Aucune estimation de cette nature ne semble avoir été effectuée pour les voies navigables. Or, par comparaison, la littérature mobilisable pour traiter de la question de la construction des infrastructures de transport (routier et ferroviaire) et de leur impact sur l'artificialisation est ici aussi étonnamment clairsemée. Elle se concentre sur les effets de ces infrastructures sur le développement territorial et sur les modèles destinés à mesurer leur impact sur l'occupation des sols.

Encadré 6-4 – Analyse du corpus "Infrastructures de transport"

60 articles scientifiques issus du *Web of Science* ont été dépouillés et conservés pour l'expertise. L'analyse par mots-clefs, révèle la large place accordée au champ sémantique urbain.

La quasi-totalité des articles étudiés traitent des infrastructures routières. Seules deux contributions liées aux lignes à grande vitesse ont été répertoriées dans le corpus et aucune source n'a été identifiée pour le fluvial. Cette faible représentation des travaux sur les voies ferrées est surprenante, au regard des constructions réalisées ces dernières années.

6.2.1. La remise en question des effets liés aux infrastructures de transport

Les effets indirects des infrastructures de transport, souvent qualifiés de structurants, restent difficiles à quantifier tant il est difficile d'isoler l'infrastructure des autres facteurs intervenant dans les recompositions spatiales et territoriales. Les nombreux travaux consacrés à cette question déconstruisent le "mythe des effets structurants" que les Trente Glorieuses avaient contribué à forger.

- **Mise en perspective de la question des "effets structurants" des infrastructures de transport**

La France a connu plusieurs vagues de modernisation de ses réseaux de transport, dont deux sont significatives : La première concerne le développement du réseau ferré tout d'abord sur le réseau d'intérêt national entre 1840 et 1860, puis avec les lignes locales à travers le plan Freycinet entre 1880-1914. Ensuite, la France a entrepris de combler son retard en matière d'équipement autoroutier à partir des années 1960, afin de résorber ses disparités territoriales. C'est ainsi que s'affirme ce lien entre transports et développement territorial.

Capitale politique, économique et culturelle de la France, Paris polarise l'espace français des transports. Les routes royales formaient autant de rayons partant de Paris vers les grandes villes de province et les frontières. Au XIX^e siècle, les gares parisiennes assurent la prééminence durable de la capitale dans son rôle de point nodal du réseau ferroviaire. Celle-ci est réaffirmée avec les lignes à grande vitesse (LGV). Le développement des autoroutes se fait en radial à partir de Paris. Ce n'est qu'à partir des années 1980 que sont peu à peu construits des axes transversaux qui viennent nuancer la réalité du réseau étoilé. Le transport aérien porte au paroxysme la polarisation parisienne avec les aéroports de Roissy et Orly.

Il est vrai que les relations entre Paris et les grandes villes de province sont les seules à pouvoir supporter économiquement des liaisons de transport à haut débit. Cela vaut particulièrement pour les LGV qui nécessitent des infrastructures nouvelles et dont les capacités de transport sont élevées. Leur rentabilité ne peut être assurée que par des flux très importants qui existent d'abord et avant tout entre Paris et les grandes métropoles de province, très secondairement entre ces dernières. Pour simplifier, une ligne TGV n'est rentable qu'entre Paris et une très grande ville de province. Il existe ainsi un effet boule de neige entre transport et métropolisation. Les métropoles génèrent les flux les plus importants, ce qui y justifie la localisation des transports les plus performants, ce qui renforce à son tour la polarisation sur ces dernières.

Ainsi, le déterminant majeur de la construction d'une infrastructure de transport est d'abord de répondre à la demande de trafic. Mais elle l'alimente en retour en élargissant les opportunités liées aux gains d'accessibilité. Le trafic appelle le trafic, notamment entre les plus grandes villes et à l'intérieur des aires urbaines. C'est pourquoi il est nécessaire de questionner le lien entre développement des infrastructures de transport et développement territorial. Il n'existe pas de relation directe entre développement et infrastructure de transport (routier comme ferroviaire). Ces infrastructures en sont une condition nécessaire mais non suffisante. Sur le long terme, elles tendent même à accentuer les tendances lourdes à l'œuvre en renforçant les zones dynamiques par effet d'aspiration et en affaiblissant les zones les plus fragiles qui deviennent de simples espaces de transit ou au mieux des espaces récréatifs.

Encadré 6-5 - Jeu d'acteurs et gouvernance territoriale

Les villes et les régions sont des acteurs montants du financement des infrastructures, là où le désengagement des politiques d'équilibre territorial par l'Etat exacerbe la compétition interurbaine. Parallèlement, l'évolution des procédures de concertation permet une participation plus active des acteurs locaux et du public au processus de décision. Ces évolutions tendent à infléchir la logique réticulaire nationale en faveur des enjeux d'accessibilité et d'attractivité locaux et d'un arbitrage plus équilibré entre logiques d'acteurs aux intérêts divergents.

L'acceptation des grands projets d'infrastructure de transport par les différents acteurs d'un territoire est une question centrale et influe directement sur l'artificialisation des sols. Les approches multi-acteurs se développent et il est avéré que le degré de collaboration et de partenariat entre acteurs est essentiel à la réussite d'un projet (Faivre 2003). De la même manière, analysant le rôle joué par le TGV Est dans l'activation des ressources touristiques rémoises, Bazin et al (2010) montrent que "l'appropriation collective de l'innovation que constitue la desserte à grande vitesse" et la capacité des acteurs à collaborer constituent "la clef de l'émergence des effets" positifs de l'infrastructure".

Il n'est donc pas évident d'établir un lien direct de cause à effet entre le développement de l'artificialisation et les infrastructures de transport hormis l'artificialisation directement liée aux infrastructures elles-mêmes. A la petite échelle, les infrastructures de transport amplifient les dynamiques territoriales à l'œuvre dans l'hexagone. Elles contribuent donc, à leur mesure, à amplifier les phénomènes d'artificialisation dans les régions les plus dynamiques. A la grande échelle, notamment dans les aires urbaines, elles sont un facteur essentiel et une condition de la périurbanisation. Depuis les années 1970, les échangeurs autoroutiers et les grands axes d'entrée de ville sont progressivement devenus des lieux privilégiés d'implantation des zones commerciales et d'activités. Les entrées des villes françaises s'apparentent désormais à de longs corridors commerciaux uniformes d'une ville à l'autre avec comme conséquence fréquente une très forte dégradation des paysages.

• Approche multiscalaire des enjeux liés à l'aménagement de nouvelles infrastructures de transport

L'aménagement de grandes infrastructures de transport met en tension deux logiques spatiales divergentes qui s'expriment par des enjeux scalaires spécifiques (Figure 6-6). La logique réticulaire, propre aux opérateurs de réseau et à leurs autorités organisatrices, repose sur l'optimisation de l'offre de circulation au nom de l'efficacité économique aux échelons national et supranational, et de l'accessibilité aux niveaux local et régional. La logique territoriale, généralement portée par les collectivités au nom de l'intérêt général, répond à des enjeux nationaux d'équité et de solidarité et des enjeux locaux d'attractivité.

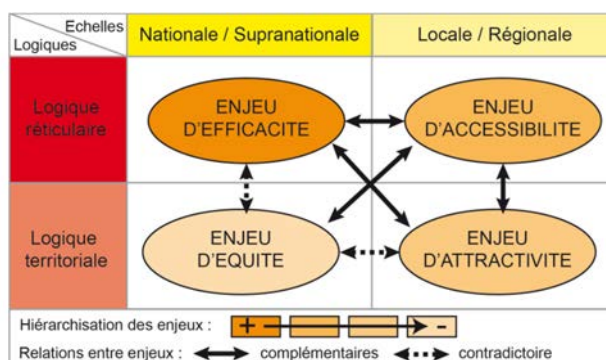


Figure 6-6. Des logiques spatiales complémentaires ou contradictoires selon les échelons géographiques (Facchinetti-Mannone et Richer 2011).

L'optimisation de la vitesse, qui impose au nom de la rentabilité économique une massification des flux au profit des axes et des nœuds les plus performants, accroît les inégalités territoriales à petite échelle, et accentue les enjeux d'accessibilité et d'attractivité à grande échelle. Le caractère discriminant de la vitesse renforce l'intérêt que portent villes et régions à l'égard d'une connexion au réseau, comme en témoignent les nombreux débats suscités par la définition des tracés des lignes ferroviaires ou autoroutes, les choix de localisation des "équipements convoités" que sont les gares TGV ou les échangeurs, ou la définition des dessertes. Leur localisation atteste par ailleurs que la limitation de l'artificialisation des sols n'est pas un déterminant (les impacts sur l'environnement de la construction des infrastructures de transport est traitée aux chapitres 2 et 3). L'accessibilité étant perçue comme un gage d'attractivité, les acteurs territoriaux se mobilisent pour obtenir le meilleur branchement au réseau afin de capter une part des "effets territoriaux" que l'on prête à la contraction de l'espace-temps. L'enjeu est de garantir à la population et aux principaux générateurs de trafic des territoires concernés une accessibilité performante au macro-réseau, ce qui cadre bien avec les vertus économiques des grandes villes et métropoles (cf. Chapitre 1.).

6.2.2. Modèles étudiant l'influence des infrastructures de transport sur l'occupation des sols

De multiples outils de simulation ont été développés pour prévoir l'influence des réseaux de transport sur les territoires. Des modèles de type LUTI (*Land Use and Transport Integrated*) ont été développés dès les années 1960 pour comprendre les interactions entre transport et occupation des sols. De très nombreux modèles existent selon différents paradigmes (Figure 6-7). « Urbansim » a, par exemple, été utilisé pour tester des politiques de densification des tissus urbains, afin de montrer les conséquences sur les réseaux de transport. Ils s'appuient aujourd'hui sur la télédétection, comme principale source pour repérer les changements d'occupation directs et indirects des sols liés à la création d'une infrastructure. Il faut à la fois une grande précision typologique des occupations du sol (ex : Aéroport, Commerce, Autoroute, Bâti industriel, Bâti résidentiel, Parc public, Parc naturel, Place publique, Emprise ferroviaire, Réserve foncière, Surface en eau) et des données de changements d'occupation des sols sur le temps long.

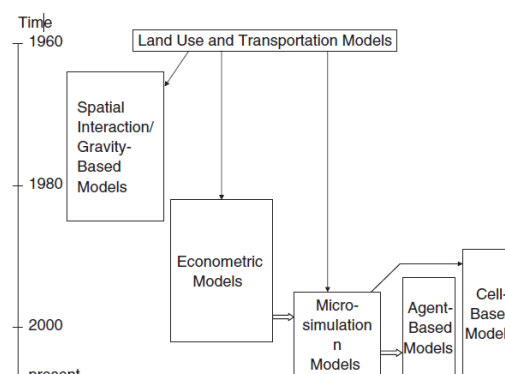


Figure 6-7. Chronologie du développement des modèles LUTI (Iacono, Levinson et al. 2008)

Les modèles mesurent l'influence du réseau de transport sur les changements d'occupation des sols. De nombreux travaux ont montré les corrélations entre le développement des réseaux autoroutiers et ses impacts sur l'évolution de l'occupation des sols et des populations. L'analyse de l'évolution de la ville de Twin Cities (Minnesota, USA) sur la période 1958-2005 montre, par exemple, que la probabilité de changement d'occupation augmente avec la proximité des autoroutes pour les activités commerciales et industrielles. En revanche, cette proximité n'exerce aucun effet sur les parcelles agricoles. La probabilité de changement s'avère même négative pour les secteurs résidentiels.

6.3. Conclusion et leviers d'action

Activités économiques portées par les entreprises et infrastructures de transport jouent un rôle important sur les formes urbaines et leur localisation a une conséquence directe sur la consommation de foncier. Les dynamiques foncières que la localisation des activités économiques engendre, restent néanmoins complexes et peu documentées dans la littérature scientifique à tel point qu'au-delà de leurs effets attendus, notamment en termes de développement territorial, il est difficile de conclure sur la façon dont ils interviennent concrètement dans les dynamiques foncières urbaines, périurbaines ou plus lointaines. De ce fait, l'identification de leviers d'action permettant de limiter l'extension spatiale de leur emprise au sol est plus que délicate et ceux-ci s'appuieront principalement sur les logiques de localisation des entreprises et infrastructures de transport (avec, pour ces dernières, un volet de maîtrise de leurs impacts environnementaux), sans être en mesure d'en évaluer l'impact en termes de surfaces consommées.

Les métropoles, et de plus en plus les Régions, incarnent les nouveaux échelons de gouvernance et la planification apparaît comme un levier important susceptible de mieux contrôler l'artificialisation des sols. La répartition des activités en périphérie des villes appelle à une reconsidération du centre-ville par les acteurs économiques, de même que l'effet de développement des infrastructures de transport se voit aujourd'hui remis en question. En définitive, l'émergence de nouveaux secteurs ou l'augmentation de la productivité des facteurs, sont susceptibles de modifier les logiques de développement de la ville secteur par secteur et donc la structure foncière de la ville. Au-delà du débat sur la priorité à accorder ou pas aux zones métropolitaines dans les politiques d'aménagement du territoire, les enjeux en matière de politiques publiques que ce constat soulève sont malheureusement très peu étudiés par la littérature. C'est un des domaines dans lesquels il y a nécessité à entreprendre des études plus avancées.

Sous l'effet de phénomènes de métropolisation de la fonction logistique, les grandes régions urbaines ont récemment vu le nombre d'équipements dédiés à ces activités se multiplier et s'organiser spatialement de façon bien plus mouvante et centrifuge que la plupart des autres activités économiques. Ces phénomènes contribuent à l'efficacité des économies métropolitaines, en réduisant les coûts logistiques inhérents aux espaces urbains complexes, mais ils le font avec des dommages collectifs environnementaux non négligeables. L'intégration de la fonction logistique dans les documents de planification locaux permettrait de mieux réguler leur implantation et leur construction. Il en est de même à l'échelon régional. D'une façon générale, un regroupement physique ("clusterisation") des installations logistiques dans les territoires métropolitains et régionaux serait un objectif à poursuivre, dans la mesure où la gestion plus efficace des infrastructures qui en résulte permet d'envisager des équipements multimodaux et une architecture moins consommatrice de foncier. Enfin, la question des plateformes logistiques va de pair avec celle des modes de consommation et de leur impact sur l'artificialisation des sols.

Quel que soit le mode de transport, les déterminants des projets d'infrastructure résultent d'un processus complexe qui associe des impératifs techniques et des contraintes imposées par la topographie et la préservation de l'environnement. Cependant, la décision finale s'effectue sur la base de critères financiers et d'objectifs politiques. Ainsi, une histoire décisionnelle des grands projets d'infrastructure serait fort utile pour mieux comprendre les choix opérés par le passé en partant du rapport du ministère sur l'évolution des infrastructures linéaires de transport. Par ailleurs, les travaux sur l'artificialisation par les infrastructures de transport sont centrés sur les espaces urbains et péri-urbains, sans prendre en considération les impacts sur les espaces plus lointains. Une réflexion à l'échelle des unités urbaines pourrait gagner en pertinence. Par ailleurs, l'élargissement du champ et de l'échelle des études d'impact précédant la construction des infrastructures permettrait de prendre en considération les impacts et nuisances plus globalement.

Les routes constituent la majorité des travaux de recherche alors que le réseau de ligne à grande vitesse est en augmentation. Les effets de la grande vitesse ferroviaire sont souvent abordés d'un point de vue économique mais sans suffisamment mesurer l'impact de ces nouvelles infrastructures sur l'occupation des sols. Il apparaît donc essentiel que l'ensemble des sciences régionales s'empare de cette question. A l'inverse, les lignes d'intérêt local font l'objet de fermetures régulières. Ainsi, la question de la "désartificialisation" et de leur requalification doit être posée car ce sont des opportunités pour la biodiversité, mais aussi pour les modes de déplacement doux (voies vertes, pistes cyclables, etc.).

7. Les spécificités de l'artificialisation des littoraux

Le littoral est soumis aux mêmes types d'artificialisation que le reste du territoire, mais ils y présentent des particularités : poids du tourisme et de l'habitat diffus dans le développement de l'urbanisation, influence des activités maritimes (pêche, militaires, commerce, plaisance notamment) dans le développement des infrastructures portuaires... Le littoral présente également une forme spécifique d'artificialisation : les aménagements destinés à protéger les terres littorales des incursions de la mer et, plus récemment, à maintenir un estran auquel le développement des activités touristiques confère une grande valeur économique.

Les enjeux associés à l'artificialisation du littoral sont aussi en partie identiques à ceux des autres territoires : consommation des terres agricoles, fragmentation des espaces agricoles et naturels... Ils y apparaissent toutefois exacerbés, en raison de la limitation structurelle de l'espace littoral, de la sensibilité aux perturbations de ses écosystèmes et du rivage, et des effets de l'élévation du niveau marin. En concentrant ses aménagements et ses activités sur le littoral, l'homme en altère les milieux et le fonctionnement. Il s'expose ainsi à divers effets de rétroaction : la dégradation des ressources exploitées, notamment halieutiques ou paysagères, la relégation de certaines activités et populations traditionnellement implantées sur le littoral, l'aggravation de l'exposition des aménagements et des populations aux risques côtiers...

Définitions du littoral

En tant que milieu naturel, le littoral est une interface soumise aux dynamiques terrestres, marines et atmosphériques qui en déterminent la morphologie. On le décompose habituellement en trois zones : la zone infratidale, dont l'extension vers le large dépend de la morphologie sous-marine et qui correspond à des fonds généralement inférieurs à la dizaine de mètres ; la zone intertidale, de balancement des marées, qui occupe selon les façades maritimes une surface réduite (Méditerranée) ou relativement importante (Manche) ; la zone supratidale, toujours émergée mais soumise aux influences marines (submersion de tempête, embruns, transport éolien de sable...).

Sur le plan juridique, le littoral est défini par une réglementation spécifique qui s'y applique par bandes (bande de 100 m de la loi Littoral, bande des 50 pas géométriques en Outre-mer), ou par zones (communes de la loi Littoral, espaces remarquables, espaces proches du rivage), pour en maîtriser l'aménagement. De tels zonages s'établissent également vers le large (bandes des 300 mètres (police spéciale sur la baignade et les ports de plaisance), des 3 milles (interdiction de certaines pêches), des 12 milles (mer territoriale), des 200 milles (zone économique exclusive) pour réglementer l'usage des ressources marines, la sécurité maritime ou les espaces de souveraineté nationale. Le littoral est également en partie compris dans le domaine public maritime, ce qui lui accorde une certaine forme de protection (régime des contraventions de grande voirie notamment en cas d'aménagement ou d'occupation, dépôts, extractions sans autorisation, ou dégradations). Une "zone côtière" plus large est à considérer pour prendre en compte les interdépendances fonctionnelles (environnementales et socio-économiques) du littoral avec son arrière-pays.

Encadré 7-1 - Le corpus bibliographique et son analyse

Les ouvrages retenus fournissent des données de cadrage sur les écosystèmes littoraux, leur géomorphologie, leur aménagement et leur gestion. Ils ressortissent donc à la fois des sciences naturelles (géologie-géomorphologie, biologie marine) et des sciences humaines et sociales (géographie, histoire, etc.), ou du droit.

Les articles scientifiques retenus sont soit des synthèses (20 articles), soit des études de cas. Globales ou nationales, les synthèses portent sur certains habitats (récifs coralliens, mangrove, marais maritimes, etc.), ou bien sur des processus historiques ou en cours (subsidence des deltas, élévation du niveau marin, urbanisation et « coastal squeeze », etc.). Nous avons recherché en particulier les travaux décrivant les habitats littoraux, leurs ressources, leur fonctionnement, et les impacts qui exercent les aménagements anthropiques. De ce point de vue, les études de cas fournissent des exemples précis d'évolution des littoraux en lien avec leur artificialisation, que ce soit à travers la destruction des habitats, l'altération des processus hydrodynamiques et leurs effets socio-économiques.

Les travaux exploités concernent la plupart des régions du globe : outre les travaux français, les études retenues portent sur les littoraux européens (24, dont une forte proportion sur la Méditerranée), nord-américains et australiens (19). Des travaux sud-américains (4) et africains (6) ont également été retenus. Il convient de noter qu'une attention particulière a été accordée aux travaux concernant les DOM et la Polynésie, notamment pour rechercher les éventuelles spécificités de l'artificialisation de ces littoraux. Mais, les 14 articles retenus montrent finalement que, si la population et les activités y sont généralement concentrées dans d'étroites plaines littorales, l'artificialisation pour exacerbée qu'elle puisse être ne présente pas de réelles particularités autre que des pratiques réglementaires teintées de localisme.

7.1. L'artificialisation du littoral

• Une occupation et une artificialisation anciennes

Le littoral constitue un espace riche en ressources et attractif pour les sociétés. Très tôt, des populations ont su tirer parti de ces ressources pour leur alimentation (produits de la pêche, sel) et diverses activités (engrais et amendements agricoles, matériaux de construction...). Certaines de ces ressources sont devenues la base d'échanges commerciaux conséquents et durables. Les climats littoraux, les facilités d'aménagement et la qualité des sols alluviaux des plaines côtières, associés à des apports d'eau douce de l'arrière-pays, ont aussi favorisé le développement d'une agriculture littorale. Les caractéristiques des sites et leur situation "expliquent" les choix d'implantation des activités et des aménagements sur les littoraux. Ces facteurs se combinent pour fonder les potentialités de chaque lieu, mais leur influence est très variable selon les groupes sociaux et les époques.

La cohabitation avec la mer comporte toutefois d'importantes contraintes et des risques, que les sociétés littorales ont longtemps subis, avant de s'en prémunir par divers aménagements. Une ingénierie côtière est ainsi apparue dès l'Antiquité, dans les ports de Méditerranée, puis s'est développée à partir du Moyen âge avec la poldérisation des rivages de la mer du Nord. Longtemps limités par les capacités techniques, les moyens de protection contre la mer se développent massivement à partir de la révolution industrielle, faisant de l'homme un agent géomorphologique majeur des littoraux.

• La concentration actuelle de la population et des activités et ses déterminants

Les littoraux connaissent depuis la fin du XIX^e siècle à la fois une intensification et une diversification de leur artificialisation. Elles sont notamment liées à la métropolisation, à la maritimisation de l'économie mondiale et au développement portuaire, au développement du tourisme (résidentiel et équipements de loisirs), à l'exploitation de ressources *offshore*, notamment énergétiques (hydrocarbures, énergies marines renouvelables). Excepté dans les régions à fortes contraintes imposées par le milieu (terres arctiques et, dans une moindre mesure, déserts côtiers intertropicaux), les espaces littoraux abritent une forte population, dont l'implantation relève surtout de facteurs historiques. A l'échelle mondiale, la densité de population sur les littoraux est nettement plus élevée que les densités nationales.

En France, sur seulement 4% du territoire, le littoral abrite 10% de la population totale, avec une densité (285 hab/km²) 2,5 fois plus élevée que la moyenne métropolitaine (en 2010). La population y augmente plus rapidement avec une pression de construction de logements trois fois plus élevée que dans l'intérieur. Il en découle une artificialisation plus forte : entre 2006 et 2012, elle a progressé deux fois plus vite sur le littoral qu'à l'intérieur des terres. En 2012, 14,6% du territoire des communes littorales est artificialisé contre une moyenne métropolitaine de 5,5% (données Corine Land Cover)²². Excepté en Guyane, la densité de population littorale et l'artificialisation sont encore plus élevées dans les DOM. Mais elles décroissent rapidement vers l'intérieur en raison du relief accidenté ou, comme en Guyane, de l'occupation par la forêt tropicale et de l'absence d'axes de communication.

• L'aménagement spécifique du littoral

L'aménagement du littoral (et les ouvrages associés) répond aux besoins liés aux activités économiques maritimes directes (pêche, tourisme balnéaire) ou favorisées par les conditions géographiques propices (commerce, agriculture), ainsi qu'à l'urbanisation associée (logement, infrastructures de transport). (Tableau 7-1). Ces aménagements sont généralement complétés par des ouvrages de protection contre la mer. Cette protection prend la forme soit d'une ligne de défense située en avant, sur, ou en arrière du trait de côte, fondée sur des ouvrages en dur (murs, perrés, cordons d'enrochement) ou "doux" (ganivelles, dispositifs de rechargement ou de stabilisation de plages), soit de zones tampons naturelles ou en partie aménagées.

Usage	Type d'ouvrages
Activités portuaires	Quais, cales, ouvrages de protection portuaire (jetées, môles)
Polders	Digues, écluses, remblais, cordons d'enrochement des polders agricoles, industriels, urbains ou d'infrastructures (aéroports)
Infrastructures de transport	Routes côtières, ponts, viaducs
Aménagements touristiques	Hôtels, stations balnéaires, marinas, ports de plaisance
Urbanisation littorale	Murs, perrés, fronts de mer, promenades
Ouvrages de protection contre la mer	Murs, digues, perrés, cordons d'enrochement, épis

Tableau 7-1. Types d'artificialisation spécifiques au littoral

²² Chiffres certainement sous-estimés et n'intégrant qu'incomplètement le mitage, car établis d'après la cartographie Corine Land Cover au 1/100 000^e et ne distinguant que les entités de plus de 2,5 ha.

• Des écosystèmes productifs mais fragiles

A l'interface entre terre et mer s'établissent des écosystèmes originaux, capables de supporter des conditions difficiles et changeantes : salinité, émergence/immersion par les marées, exposition aux agents hydrodynamiques, mobilité sédimentaire... Ces écosystèmes, notamment les marais maritimes, mangroves et récifs coralliens, figurent parmi les plus productifs de la planète, notamment par leur fonction d'habitat pour de nombreuses espèces végétales et animales. Espaces tampons entre domaines terrestre et marin, ils jouent un rôle majeur dans le maintien des équilibres écologiques et hydrologiques globaux : par exemple les zones humides littorales constituent des lieux privilégiés de reproduction et de nurserie pour de nombreuses espèces marines, et offrent une fonction filtrante et d'épuration des eaux continentales tout en atténuant les effets des houles marines sur les côtes. La destruction des écosystèmes littoraux est donc susceptible d'avoir des impacts drastiques sur les cycles hydrologiques, les habitats et les peuplements halieutiques.

Ces écosystèmes côtiers, rares à l'échelle de la planète, sont directement affectés par l'artificialisation des espaces qu'ils occupent ou leur utilisation comme décharges sauvages, mais aussi, indirectement, par les répercussions hydro-sédimentaires des aménagements réalisés à proximité, et par les pollutions d'origine industrielle ou domestique, continentales et apportées par les cours d'eau, ou littorales (Encadré 7-2).

Encadré 7-2 - Deux écosystèmes littoraux tropicaux menacés : les mangroves et les récifs coralliens

Les mangroves, forêts littorales des milieux tropicaux humides sont l'un des habitats les plus menacés de la planète : elles occupent encore 170 000 km² dans le monde, mais l'artificialisation, notamment par défrichement pour des développements aquacoles, agricoles et urbains, en a réduit la superficie de 35% depuis les années 1980. Tant qu'ils étaient considérés comme des milieux insalubres, ces espaces amphibies avaient pour principale fonction le rejet de matériaux et de déchets divers, pouvant aboutir à leur remblaiement progressif. Les mangroves restantes sont convoitées par l'exploitation forestière, l'agriculture et l'aquaculture. De plus, la diminution des apports d'eau douce et de leur qualité (pollution, salinité) conduisent à leur dépérissement. Mais l'urbanisation, les aménagements touristiques et résidentiels, et l'industrialisation en constituent les principaux facteurs d'altération.

Les récifs coralliens sont aussi des écosystèmes menacés : au début des années 2000, 30% des 300 000 km² de récifs coralliens de la planète étaient ainsi considérés comme dégradés, et leur superficie avait été réduite de 10% en quelques décennies. Ces formations sont l'objet de destructions directes, par leur exploitation minière ou par leur remblaiement lors d'aménagements tels que la construction de ports ou de marinas. Particulièrement sensibles à la turbidité et à la pollution des eaux (fluviales et littorales), les coraux sont aussi affectés par tous les travaux d'aménagements et la fréquentation touristique. A Tahiti, l'érosion liée à la construction dans des secteurs très pentus conduit à une hyper-sédimentation des lagons et à l'asphyxie des récifs frangeants. A Mayotte, l'intensification de l'érosion et le recul rapide de la mangrove contribuent fortement à l'envasement du lagon depuis les années 1980.

• Les différentes tendances en œuvre

- Certains secteurs littoraux situés en zone (ultra)périphérique et/ou présentant des désaménités climatiques (côte aux vents en outre-mer) ou topographiques (côtes à falaises, marais maritimes), restent préservés d'une forte artificialisation et constituent des espaces de conservation, ou de tourisme écologique ou rural, parfois un peu marginaux.
- Sur les littoraux sous pression foncière, seules les activités dégagant une plus-value ou bénéficiant d'une valeur suffisamment importante pour réussir à concurrencer les usages urbains, touristiques, industriels ou commerciaux, parviennent à se maintenir : agriculture maraîchère et primeurs, viticulture, sites à forte valeur patrimoniale environnementale ou culturelle.
- Mais sur la plupart des littoraux, les activités traditionnelles, notamment primaires, peinent à rivaliser avec l'implantation de nouvelles activités qui dégagent des marges beaucoup plus fortes à court terme. Cette situation est particulièrement pénalisante pour les activités qui requièrent d'importantes surfaces et une implantation littorale (pêche et surtout aquaculture).

Ces tendances sont toutes accentuées dans le contexte actuel des changements globaux, qu'ils soient démographiques (par l'accroissement des populations littorales), économiques (par la concentration des activités liées à la maritimisation de l'économie), ou environnementaux (exposition directe des enjeux à l'élévation du niveau marin).

7.2. L'artificialisation de protection contre la mer

Ces formes d'artificialisation spécifiques du littoral que sont les aménagements visant une protection contre la mer ont des impacts, intentionnels et non intentionnels, sur l'environnement physique et les écosystèmes. Ces impacts interviennent à plusieurs échelles, car les flux liés à la dynamique des milieux littoraux contribuent à diffuser les effets à distance.

7.2.1. Les aménagements et leurs effets

Le littoral est un système hydro-sédimentaire ouvert et dynamique, complexe. Sur les littoraux meubles, la plupart des formations sédimentaires sont héritées d'évolutions anciennes, mais les sédiments y sont en permanence remaniés par les agents hydrodynamiques (les courants et surtout les houles) ou les vents. L'évolution qui en résulte dépend du bilan sédimentaire local (Encadré 7-3), que l'artificialisation peut ou vise à modifier.

Encadré 7-3 - Le bilan sédimentaire des estrans meubles

Ce bilan quantifie la production, le transport, l'accumulation et l'évacuation des sédiments sur une période de temps définie (Figure 7-1). Les sédiments (vases, sables ou galets) proviennent des apports terrestres alimentés par l'érosion continentale et transportés par les cours d'eau, et des apports marins, composés de matériaux détritiques issus de la plateforme continentale ou produits par des organismes marins. Ces sédiments peuvent être remobilisés par la dérive littorale (longitudinale) et les courants côtiers. Ces transports s'effectuent dans le cadre de compartiments hydro-sédimentaires, indépendants les uns des autres, délimités par des discontinuités du rivage, naturelles (caps, embouchures) ou anthropiques (épîs, jetées portuaires). Les matériaux peuvent aussi quitter la zone littorale sous l'effet de transferts éoliens alimentant les dunes, ou par dispersion vers le large par des courants de retour.

Si l'apport sédimentaire dans un compartiment excède la capacité des agents hydrodynamiques à le disperser, il y a accumulation, se traduisant par une progradation du trait de côte. Dans le cas contraire, le rivage est érodé et cède du terrain à la mer. Si le budget est équilibré, le trait de côte connaît une stabilité dynamique autour d'une position moyenne, c'est-à-dire un remodelage permanent sous l'effet des agents hydrodynamiques.

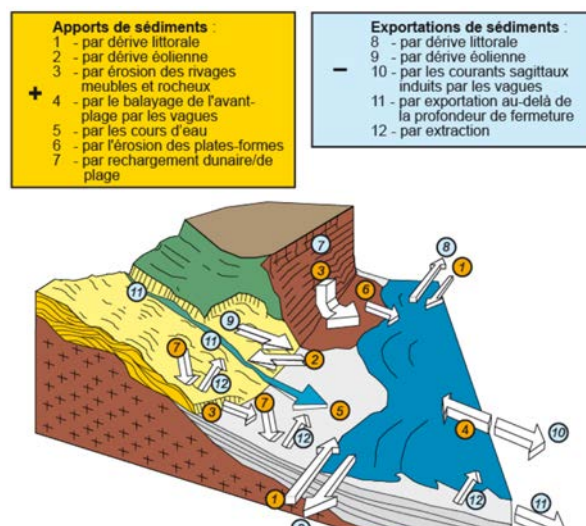


Figure 7-1. Le budget sédimentaire d'un estran meuble de région tempérée (auteur : A. Hénaff)

• L'aggravation de l'érosion des plages et des dunes

D'après une étude de l'érosion côtière en Europe datant de 2004, 70% du linéaire des plages sont en cours d'érosion, 20% sont stables et seulement 10% sont en cours de progradation. Cette situation résulte d'évolutions naturelles, l'abondance sédimentaire héritée des apports liés à la transgression flandrienne²³ ayant fait place à une situation de pénurie, mais les interventions humaines aggravent ce déficit sédimentaire.

Trois types d'artificialisation conjuguent leurs effets :

- l'artificialisation des cours d'eau, avec la construction de nombreux barrages qui piègent leur charge grossière (sables, galets), cause une pénurie sédimentaire, qui peut être localement aggravée par des extractions de granulats dans les lits fluviaux ou sur les fonds côtiers ;
- l'artificialisation longitudinale (par des murs ou des enrochements) perturbe l'équilibre dynamique du trait de côte et accentue le démaigrissement des plages, qui se produit notamment lors d'événements météo-marins hivernaux érosifs ;
- l'artificialisation transversale (par des épîs ou des jetées) bloque la dérive littorale et favorise l'érosion des compartiments situés en aval-dérive, par défaut d'alimentation en matériaux sédimentaires.

Les effets conjugués de ce déficit d'apports sédimentaires et de la dérive littorale se traduisent par une augmentation de l'érosion littorale. Pour lutter contre ce phénomène, se met généralement en place un nouveau cycle d'aménagements successifs, qui ne font que reporter l'érosion en aval-dérive, jusqu'à l'artificialisation complète du rivage. Celle-ci n'empêche pas le démaigrissement des plages, qui peut aller jusqu'à leur disparition. L'implantation d'ouvrages statiques dans des systèmes (littoraux) en équilibre dynamique s'avère donc être un non-sens naturaliste.

De même, les systèmes dunaires côtiers, dont l'origine remonte à la dernière glaciation (il y a environ 12 000 ans), peuvent connaître une érosion/régression ; si la dune ne peut plus reculer à cause des aménagements ou de l'urbanisation, elle peut disparaître.

²³ La transgression flandrienne, due à la fonte des glaciers, correspond à une remontée brutale du niveau de la mer dont l'équivalent n'a pas été reconnu au cours des temps géologiques, à tel point que l'on ne connaît pas de forme estuarienne fossile. (Source : Encyclopaedia Universalis).

• La subsidence des deltas

Si les apports liés à l'érosion des sols forestiers puis agricoles ont pu par le passé contribuer de manière significative à l'alimentation sédimentaire des littoraux, l'artificialisation des cours d'eau par de multiples barrages et la consommation de l'eau par l'irrigation sont actuellement les déterminants principaux de la subsidence de 70% des deltas du monde. La charge sédimentaire du Danube a en effet été réduite de 30%, celle de l'Ebre de 95%. Cet apport réduit de sédiments fluviaux ne permet plus d'assurer l'accrétion naturelle de nombreux deltas, ni même de compenser leur affaissement naturel dû à la compaction sous l'effet du poids des sédiments accumulés. Ce phénomène est souvent aggravé par les ouvrages de protection contre la mer et les aménagements aquacoles, mais aussi par la surexploitation des aquifères, le drainage ou l'extraction d'hydrocarbures, et par le dépérissement des mangroves qui retenaient les sédiments.

• La poldérisation des zones humides littorales

La poldérisation, ou endiguement progressif des zones humides littorales pour y favoriser le piégeage sédimentaire et en accélérer l'accrétion naturelle, s'est d'abord développée sur les rivages de la mer du Nord, avant de se diffuser à l'échelle mondiale. Pratiquée initialement au profit de l'agriculture, de l'aquaculture et de la saliculture, elle a surtout, à partir du XIX^e siècle, été effectuée pour l'urbanisation et le développement économique, auxquels elle procurait des terres bon marché et qui évitaient les conflits liés à l'empiètement sur des terres agricoles. De grandes villes comme Amsterdam, Venise, Tokyo ou Djakarta se sont étendues sur d'anciens marais maritimes. L'installation d'infrastructures portuaires et d'établissements industriels encombrants ont aussi constitué un important facteur de poldérisation. Dans l'estuaire de la Seine, entre 1834 et 1978, les espaces intertidaux sont ainsi passés de 130 à 31 km². A l'échelle mondiale, 67 % des marais maritimes ont été ainsi conquis au cours de la période historique.

• Des risques accrus par les effets du changement climatique

L'élévation du niveau marin aggrave le rétrécissement de la zone intertidale. La fixation du trait de côte par des ouvrages longitudinaux de type mur ou enrochement, en empêchant le "recul" des estrans sableux et des formations dunaires, ne leur permet plus de s'adapter à l'élévation du niveau marin et les expose à l'érosion. Il en est de même dans les zones humides poldérisées, où les vasières intertidales, situées en avant des digues, tendent à régresser. Ces évolutions, qui mettent en contact direct les milieux infratidaux et supratidaux, altèrent la succession des habitats qui fonde la productivité des écosystèmes littoraux. Localement, le rythme de régression des estrans et des marais maritimes peut être tel qu'il laisse craindre leur disparition à court terme. Au niveau mondial, l'élévation du niveau marin pourrait conduire à une perte de 70% des écosystèmes littoraux (zones humides littorales, mangroves) d'ici la fin du siècle.

7.2.2. Les options de gestion dynamique du trait de côte et les méthodes "douces"

Face aux risques liés à l'élévation du niveau marin, quatre scénarios d'adaptation des aménagements littoraux sont classiquement envisagés :

- a) Ne rien faire constitue une base de référence plutôt qu'une option sérieusement considérée dans la mesure où son coût à long terme risque d'être très élevé ;
- b) Tenir, en renforçant les défenses côtières, est l'option envisagée dans les espaces les plus artificialisés donc techniquement, financièrement ou humainement difficiles à relocaliser. Sur les littoraux à très forte croissance démographique, comme les deltas ou les mégapoles littorales, ce choix imposera vraisemblablement de lourds aménagements et des mesures drastiques, sans pour autant supprimer le risque .
- c) Avancer, c'est-à-dire artificialiser l'avant-côte par des protections avancées de type brise-lames ou par la poldérisation, pour augmenter la distance entre les enjeux existants et les aléas côtiers, est envisagé dans les sites à forts enjeux. Cette option de la "ligne de défense" est appliquée aux Pays-Bas (Plan Delta). Mais à quel coût écologique ?
- d) Opérer un *recul stratégique*, en ménageant des espaces tampons entre les enjeux humains et la mer, notamment par la réhabilitation de zones humides littorales. Dans les polders agricoles ou les littoraux peu aménagés, où les enjeux restent modérés, cette stratégie est généralement considérée comme la meilleure par les gestionnaires, d'autant qu'elle permettrait de rééquilibrer l'aménagement au profit de l'arrière-pays. Mais elle se heurte à des réticences à abandonner des terrains durement conquis sur la mer, ainsi qu'aux intérêts des propriétaires fonciers.

Il est préconisé de privilégier les méthodes "douces" visant à accompagner l'évolution du trait de côte (*building with nature*), en favorisant sa stabilisation dynamique plutôt que sa fixation à tout prix. Les techniques d'ingénierie écologique mobilisées s'apparentent à un entretien artificiel et continu du fonctionnement des systèmes hydro-sédimentaires. En théorie, les avantages d'une telle gestion dynamique du littoral sont multiples : amélioration de la résistance à l'érosion marine, conservation de la valeur écologique, et coût moindre que pour une protection fixe. La viabilité de cette option dépend des processus naturels à gérer, mais aussi de son intégration à l'ensemble du processus d'aménagement.

7.3. Les spécificités de l'urbanisation du littoral

7.3.1. Les déterminants socio-économiques

- Les implantations urbaines anciennes

Les déterminants géographiques de ces localisations sont bien connus. A l'échelle locale, les caractéristiques du site (liées à sa topographie, son hydrographie, sa salubrité...) peuvent favoriser des fonctions d'abri défensif ou portuaire, ou de rupture de charge entre terre et mer, comme dans le fond des baies abritées ou des estuaires. Par exemple, dans les anciennes colonies antillaises, l'implantation des bourgs dans la plaine littorale et à l'embouchure des rivières visait à faciliter le commerce. A l'échelle régionale, la qualité du lieu est fonction de sa situation stratégique par rapport à l'accès aux ressources halieutiques et terrestres, aux voies de navigation et d'échange, ou bien à la surveillance ou au contrôle d'un territoire. L'essor des grandes thalassocraties antiques (Athènes) ou médiévales (Venise, ligue hanséatique) a ainsi reposé sur le contrôle des routes du grand commerce par mer et par terre.

Ces emplacements hérités ont pu se trouver disqualifiés ou au contraire renforcés par les évolutions économiques et démographiques engendrées par la révolution industrielle, et par les mutations sociétales qui les accompagnent.

- Urbanisation littorale et métropolisation

Dans la plupart des pays ayant une façade maritime, les villes principales (plus de 100 000 habitants) sont situées en bord de mer. Ces populations se sont concentrées progressivement dans les villes portuaires antiques ou médiévales, comme en Extrême-Orient, dans le bassin méditerranéen et sur les pourtours de la Baltique ou de la mer du Nord. Dans d'autres régions, une part importante des villes littorales doit son origine aux expansions coloniales et aux migrations transocéaniques, essentiellement européennes entre le XVI^e et le début du XX^e siècle, que ce soit vers l'Amérique, l'Australie ou l'Afrique du Sud, où de grandes villes ont ainsi été fondées *ex nihilo* (Rio de Janeiro, Boston, Sydney...). Symétriquement, les ports de métropole ont bénéficié de l'essor colonial, par la création de bases militaires (Brest, Lorient, Le Havre...) et par le commerce des richesses d'outre-mer (Séville, Hambourg, Amsterdam...). De fait, la plupart des grandes agglomérations littorales, et en particulier des métropoles dominantes comme Londres, New York et Tokyo, doivent une partie de leur puissance à leur trafic maritime passé ou présent.

Le manque d'espace et la concurrence avec d'autres infrastructures (les ports par exemple) peut, selon les sites, orienter l'artificialisation vers l'aval et la mer, ou vers l'intérieur. Des villes ont ainsi gagné sur la mer, sous forme de quartiers flottants (Hong Kong, Bangkok) ou de polders (aéroports de Sydney, Hong Kong, Papeete).

- Villégiature et tourisme à partir du XX^e siècle

Sur tous les littoraux présentant des aménités paysagères ou balnéaires, le tourisme constitue l'un des principaux facteurs d'artificialisation. Son développement, plutôt récent, découle de l'évolution des goûts de la société, de l'élévation des revenus des ménages, de l'allongement du temps libre (congés payés, réduction du temps de travail, retraite) et de l'essor de la mobilité. Le "désir de rivage" repose sur les aménités spécifiques du littoral, climatiques (bienfaits de l'air marin, ensoleillement), paysagères (esthétique valorisée de la vue sur mer) ou balnéaires et récréatives (activités nautiques).

La massification du tourisme, à partir des années 1920, conduira à l'aménagement de plusieurs générations de stations balnéaires, généralement issues d'opérations lourdes et planifiées (à l'exemple du Plan Racine sur la côte languedocienne). Ces stations constituent ensuite des noyaux d'urbanisation diffuse et peu encadrée. Le développement touristique d'abord saisonnier (camping sauvage, caravanage, paillotes) tend à s'y sédentariser de manière plus ou moins légale. La construction mal maîtrisée des résidences secondaires aboutit à une forte consommation d'espace et au mitage des zones agricoles et naturelles, ainsi qu'à une perte des qualités esthétiques à l'origine de ce tourisme balnéaire.

- Choix résidentiel et urbanisation diffuse

Plus récemment encore, les mêmes facteurs (élévation des revenus, diffusion de nouveaux comportements, allongement du temps libre, développement des grandes infrastructures de transport...) se combinent à la recherche d'un cadre de vie de qualité et aux possibilités de travail à distance offertes par les NTIC, pour faire évoluer les choix résidentiels (cf. Chapitre 5). Le littoral n'est pas seul concerné par ces relocalisations, mais il cumule toutes les conditions pour attirer les retraités, de même que les actifs motivés notamment par la pratique de loisirs nautiques (plaisance, surf).

L'urbanisation qui en découle suit généralement plusieurs étapes : une phase de mitage, par la prolifération anarchique de constructions individuelles en dehors des noyaux urbanisés et au plus près du littoral ; une étape de colonisation mieux organisée, par la construction de lotissements ; et enfin une phase de mise en place de mesures réglementaires pour affecter les droits à construire à certains secteurs et protéger les espaces considérés comme remarquables.

7.3.2. Les impacts socio-économiques

La diversification et l'intensification récente des activités du littoral se traduisent par une artificialisation accrue, qui exacerbe la concurrence avec les activités historiquement installées sur le littoral (pêche, aquaculture et surtout agriculture) et avec les populations locales.

- Les tensions foncières

Le foncier étant structurellement rare sur les littoraux, sa valeur s'accroît en proportion de la demande. Ainsi, en France, le prix de vente des terrains à bâtir en secteur diffus est 60% plus élevé sur le littoral qu'en moyenne métropolitaine. Les terrains y sont par ailleurs plus petits (-25%), témoignant de l'effet du prix sur la propriété, mais également de l'héritage des structures foncières maraîchères propres au littoral.

Si la consommation de terres agricoles n'est pas spécifique au littoral, elle y est particulièrement forte : en France, les exploitations des communes littorales ont perdu 25% de leur surface agricole utile (SAU) entre 1970 et 2010, contre 12% dans l'arrière-pays et 10% en moyenne métropolitaine.

- La relégation économique ou sociale de populations locales

La population permanente peut pâtir de cette tension foncière, à travers l'appropriation du littoral par les catégories sociales les plus aisées et la hausse des prix, voire la spéculation foncière, qui en découlent. En France, les acquéreurs de terrain en bord de mer sont ainsi à la fois plus aisés (sureprésentation des CSP+) et plus âgés que pour l'ensemble de la métropole ; les retraités y représentent 11% des acquéreurs, soit le double de la moyenne métropolitaine. Les populations aux revenus les plus modestes, notamment les jeunes, ne peuvent rivaliser ; elles n'ont alors souvent pas d'autre choix résidentiel que de se replier vers l'arrière-pays, où le foncier et l'immobilier sont plus accessibles.

Cette situation est exacerbée sur les littoraux prisés des touristes à hauts revenus, qui y investissent massivement dans l'immobilier. Les effets sont alors à la fois démographiques (vieillesse et variation saisonnière de la population), économiques (hausse des valeurs foncières et spéculation) et sociaux (appropriation du littoral par les catégories les plus aisées, relégation des autres). Les coûts engendrés par le suréquipement des stations touristiques, souvent calibré pour les pics de fréquentation estivaux, alourdissent la fiscalité locale et peuvent aggraver encore le déclin démographique.

Dans les pays en voie de développement surtout, des formes de précarisation des communautés littorales peuvent aussi résulter directement de l'altération des milieux naturels et des ressources dont elles tiraient parti pour leur survie.

- Les rétroactions écologiques et paysagères

Dans bien des régions littorales (notamment méditerranéennes et insulaires), l'augmentation de la population urbaine et touristique induit une consommation accrue d'eau, qui peut dépasser la capacité de renouvellement de la ressource et causer un abaissement du niveau des aquifères côtiers qui se trouvent alors exposés à des intrusions d'eau salée. Cette détérioration de leur qualité, qu'une mauvaise gestion des effluents peut aussi aggraver, exacerbe les conflits d'usages avec les activités qui requièrent une eau douce ou marine de bonne qualité, comme l'aquaculture ou le tourisme balnéaire.

L'urbanisation mal encadrée contribue à une dégradation paysagère des littoraux, par la banalisation des formes urbaines et architecturales, et par la confusion paysagère créée par le mitage et la fragmentation des espaces. Dans les stations touristiques, ces altérations ôtent au littoral une partie de la valeur esthétique et récréative qui fondait à l'origine sa fréquentation.

- Des risques accrus par les effets du changement climatique

Devant la répétition des catastrophes, certains territoires réagissent en adaptant leur mode d'urbanisation par des procédures de planification plus rigoureuses visant à intégrer ces risques. Quand ce n'est pas le cas, les catégories de population qui en ont les moyens entreprennent de se reloger dans des sites moins exposés aux risques, enclenchant ainsi des dynamiques foncières nouvelles qui tendent à renforcer l'étalement urbain, mais également les inégalités sociales. En effet, lorsque la population ne dispose pas des moyens de s'adapter et que les autorités sont inopérantes, la reconstruction s'effectue sur les lieux mêmes des catastrophes, sans adaptation notable. De fait, ces catastrophes ne sont pas "naturelles", mais résultent bien d'une exposition inconsidérée d'enjeux humains et matériels à des aléas (tsunami, surcotes marines) à cause d'un aménagement inconsidéré du littoral.

Facteur aggravant, le littoral est particulièrement concerné par les effets du changement climatique en cours. Dans leur scénario le plus pessimiste, Neumann *et al.* (2015) estiment que la population exposée aux risques côtiers dans les zones basses littorales (zone submersible centennale) pourrait passer de 189 millions en 2000, à 411 millions d'ici 2060.

7.4. Les spécificités de la gouvernance du littoral

Sur les littoraux comme ailleurs, la politique du laisser-faire a longtemps dominé, conduisant à une artificialisation peu contrôlée, structurée par les opportunités foncières et par des facteurs géographiques comme la proximité du littoral, des centres urbains et des axes routiers, ou la topographie. Cette situation reste de mise dans de nombreux pays, notamment en voie de développement.

• La mise en place d'une réglementation

Les pays développés, mais aussi les pays émergents de façades littorales particulièrement convoitées, telles que les rives de la Méditerranée, se sont dotés de législations spécifiques au littoral. Elles reposent sur la mise en œuvre de principes similaires : la délimitation de zones *non aedificandi* (non constructibles), la construction perpendiculairement au littoral (dite "en profondeur"), et la protection de corridors verts notamment par la définition d'espaces remarquables. En France, la loi Littoral de 1986 est venue inscrire ces principes dans le droit de l'urbanisme, mais ses effets restent mitigés. Cette loi a également créé le mécanisme de protection des espaces dits « remarquables » en en restreignant l'usage et en préservant leur harmonie et leur intégration paysagère.

En outre, du fait de la qualité environnementale de certains espaces littoraux, les protections classiques du droit de l'environnement s'y appliquent particulièrement. Elles peuvent être le fruit soit de conventions internationales (Unesco, Ramsar...), soit de législations nationales. On y trouve ainsi par exemple des parcs nationaux (Port-Cros), des réserves naturelles (Camargue) et des parcs naturels marins (Côte d'Opale). Par ailleurs, depuis sa création en 1975, le Conservatoire de l'espace littoral et des rivages lacustres mène une politique foncière d'acquisition qui vise à la protection du « tiers naturel » du littoral français (en 2017, il en est propriétaire de 13%).

Les territoires ultramarins sont soumis aux mêmes lois que la métropole (loi Littoral, loi Paysage...), tout en étant adaptés d'un point de vue des compétences, mais la difficulté réside dans leur application aux particularismes locaux, sociaux et environnementaux. C'est le cas à Mayotte, où coexistent dans la législation foncière, des droits coutumiers musulmans et le droit commun, aux logiques en partie contradictoires. Il en est de même en Nouvelle-Calédonie. Plus généralement dans les territoires ultramarins, les principes réglementaires de la bande de 100 mètres de la loi Littoral se superposent à ceux de la zone des 50 pas géométriques (81,2 m), qui connaît des spécificités législatives, naturelles et des enjeux socioéconomiques et patrimoniaux particuliers.

• Une réglementation pas toujours efficace

Ces dispositifs ont souvent été mis en place ou appliqués trop tardivement (parfois du fait de défaillances politiques et institutionnelles) au regard des dynamiques rapides et largement spontanées de l'artificialisation du littoral. Par ailleurs, les outils restent souvent au service de la promotion du développement économique plutôt que de la protection de l'environnement. De fait, la planification urbaine est souvent accusée de suivre après coup les tendances spontanées et de distribuer les droits à construire en adaptant les zonages et la réglementation, au lieu de constituer un véritable outil d'aménagement. De plus, la multiplicité des réglementations entraîne une superposition des périmètres de gestion. Un bilan de la loi Littoral publié en 2007 faisait un constat mitigé de son application. S'il ne remettait pas en cause la légitimité d'une politique spécifique au littoral, bien au contraire, ce bilan pointait des défaillances dans son application et appelait à un renouveau de certaines dispositions. De nombreuses tensions existent autour de cette thématique entre les différents acteurs et 10 ans après ce bilan, un texte de réforme a bien été proposé mais sans pour autant aboutir.

De fait, même lorsqu'elle existe, la réglementation exerce un effet moins structurant que les facteurs économiques classiques (Encadré 7-4). Les effets de la réglementation apparaissent ainsi contrastés, entre encouragement et contrainte de l'urbanisation, protection de l'environnement et abandon de l'agriculture, "gel" du développement des territoires littoraux et report de l'urbanisation vers l'arrière-pays.

Les zonages établis pour la planification urbaine ou la protection de l'environnement participent à l'augmentation des prix du foncier, par leur effet de restriction de l'offre, et par le surcroît de valeur conféré par les aménités, notamment paysagères, liées aux espaces naturels protégés. L'effet des réglementations est tout aussi ambivalent. La loi de défiscalisation immobilière (loi Pons, 1986) appliquée dans les DOM s'est, par exemple, traduite sur les marchés fonciers par un double phénomène de morcellement et de reventes spéculatives, qui a affecté les espaces agricoles et naturels.

Encadré 7-4 - L'exemple du Pays de Brest

Bien que contestés, les effets de la protection du littoral peuvent s'avérer efficaces comme le montre l'exemple du Pays de Brest. La première figure (Figure 7-2) montre l'emprise foncière acquise par le Conservatoire du littoral dans le Pays de Brest. 23% des terrains de la bande côtière (0-100 m) y sont désormais soustraits à l'urbanisation : l'objectif du Tiers naturel n'est pas encore atteint, mais il devient tangible.

De fait, la construction sur le littoral est effectivement de plus en plus contrainte, même en dehors de ces zones protégées. L'attraction exercée de prime abord par le littoral, en l'absence de mesures de protection, tend à s'atténuer fortement dès lors qu'une réglementation est mise en place. La seconde illustration (Figure 7-3) montre l'évolution du statut des parcelles foncières entre 1968 et 2009. Elle montre que, dès le milieu des années 1970, la construction résidentielle est de plus en plus contrainte sur le littoral. L'analyse réalisée permet même d'affirmer que les mesures réglementaires (lois et documents d'urbanisme) ont effectivement réduit de moitié le risque de construction des parcelles dans la bande littorale de 100 m.

Désormais, la proximité des infrastructures (routes, services) ou celle des zones bâties préexistantes exercent une influence bien plus déterminante sur la construction résidentielle, que la proximité de la mer.

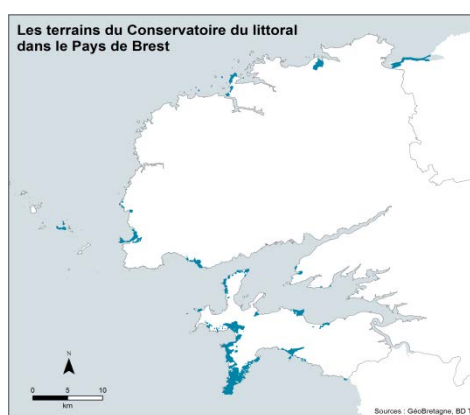


Figure 7-2. Les terrains du CEL dans le Pays de Brest (source : GéoBretagne)

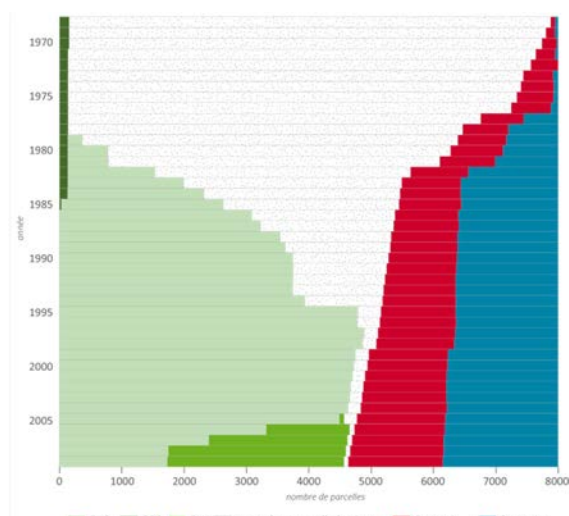


Figure 7-3. Evolution du statut des parcelles foncières du Pays de Brest dans la bande littorale de 100m entre 1968 et 2009

• La nécessité de mettre en œuvre la Gestion intégrée de la zone côtière (GIZC)

La GIZC est un outil de politique publique, que le Conseil de l'Europe appelle de ses vœux depuis les années 1970. Elle a notamment fait l'objet d'une recommandation de l'Union européenne en 2002, mais force est de constater que sa mise en œuvre n'est toujours pas effective. La GIZC permettrait pourtant de composer avec les réglementations sectorielles qui s'appliquent sur le littoral en appréhendant globalement les éléments terrestres et aquatiques, et en prenant en compte l'exploitation des ressources avec les objectifs de protection de l'environnement. De fait, si la GIZC vise à répondre aux principes du développement durable, elle peine à se concrétiser du fait des profondes divergences d'intérêts entre les usagers du littoral, mais également de la dispersion des compétences institutionnelles (situées à des échelles territoriales multiples) et de la dilution des responsabilités qui en découle.

7.5. Conclusion et leviers d'action

L'artificialisation du littoral répond donc aux déterminants que l'on retrouve sur l'ensemble du territoire, mais ces derniers s'exercent de façon accrue. Il en est de même des impacts environnementaux, qui présentent des spécificités. En revanche, il peut être surprenant de noter que les espaces littoraux ultra-marins ne présentent pas de particularités qu'on ne retrouve en métropole, du moins du point de vue des réponses en termes d'aménagement. La richesse en biodiversité, la vulnérabilité face au changement climatique et les particularismes sociétaux, appellent toutefois à des réactions spécifiques de la part des pouvoirs publics. L'artificialisation du littoral pourrait y être mieux cernée, à la fois dans sa mesure, mais aussi dans ses impacts.

La mesure de l'artificialisation du littoral. A l'échelle locale, l'observation de terrain, l'analyse diachronique de photographies aériennes ou d'images satellitaires à très haute résolution, et leur comparaison avec de l'iconographie ancienne (cartes, photographies, peintures) permettent d'observer finement l'évolution paysagère des littoraux, y compris dans ses formes les

plus diffuses. Mais pour des territoires plus larges, les analyses doivent recourir à des images de moindre résolution spatiale, ne permettant que d'identifier les formes d'artificialisation les plus massives et étendues. L'urbanisation diffuse, si répandue sur le littoral, n'est alors pas détectée, ni les effets des activités récréatives pratiquées dans la nature sans infrastructures spécifiques. L'extension réelle l'artificialisation du littoral reste donc difficile à mesurer.

La discrimination des impacts de l'artificialisation. Certaines altérations des milieux résultent de combinaisons complexes des facteurs qui rendent difficile l'établissement de relations causales. L'évolution des zones humides, par exemple, dépend à la fois de causes naturelles (accrétion, subsidence) et de causes anthropiques, directes (drainage, remblais et poldérisation) et indirectes (artificialisation des bassins versants, pollution).

Les capacités de restauration des milieux. Des études de terrain ont montré que certains écosystèmes littoraux présentent une forte capacité de résilience suite à un stress, mais aussi de nombreux cas de milieux côtiers qui n'ont pas résisté à leur artificialisation. La difficulté consiste alors à déterminer si l'absence de résilience est due à une fragilité intrinsèque ou à des perturbations trop intenses.

L'évaluation des coûts et bénéfices de l'artificialisation. Les conséquences de l'artificialisation ne sont pas forcément négatives, loin s'en faut. Par exemple, le développement touristique peut constituer une source de nouveaux revenus économiques pour la population locale, voire un facteur de protection de l'environnement et des paysages littoraux dès lors qu'ils sont considérés comme ressource touristique. Dans ce cadre l'évaluation des coûts et bénéfices de l'artificialisation constitue un outil de gouvernance utile. Généralement menés par des économistes, ces travaux s'appuient notamment sur des méthodes de coûts hédoniques (ou propension des usagers à payer pour un service offert, notamment par l'environnement) ou d'évaluation des services écosystémiques. Cependant, ces évaluations restent complexes à réaliser, donc difficiles à partager avec l'ensemble des acteurs concernés par un projet d'artificialisation de gestion. Les principales réserves qui leur sont opposées sont à la fois conceptuelles (peut-on évaluer monétairement l'environnement ?) et méthodologiques (comment s'assurer de l'exhaustivité et de l'objectivité de l'évaluation ?).

8. Eviter l'artificialisation des sols ou réduire, voire compenser, ses effets

Objet de préoccupations politiques et de débats publics intenses, l'artificialisation des sols recouvre, comme on l'a vu tout au long des chapitres précédents, une réalité économique et sociale très polymorphe qui la rend délicate à appréhender par les scientifiques. Par définition, les sols artificialisés, quelle que soit leur couverture, sont les surfaces sur lesquelles se déploient toutes les activités humaines (hors les activités agricoles et forestières). En tant que support foncier des logements, des entreprises, des services publics, des infrastructures de transport, etc., ils rendent de nombreux services à la société. Toutes ces activités ont tendance à s'agglomérer dans des villes qui, dans la période récente, se sont étalées soit en repoussant leurs frontières, soit en « périurbanisant » des espaces plus éloignés et en discontinuité avec la ville elle-même. Parallèlement, l'artificialisation des sols a des effets sur l'environnement, variables selon le degré d'imperméabilisation des sols et l'agencement local de sols à couverture différente, et sur les activités agricoles (et forestières) en concurrence pour l'usage des mêmes sols et/ou des mêmes espaces. La limitation de ces différents effets ne se pose probablement pas de la même façon selon que l'usage est résidentiel, économique ou infrastructurel et que le sol considéré est localisé en centre-ville ou en banlieue dense (dont les sols sont déjà intégralement artificialisés), en périphérie immédiate de la ville (dans la zone d'extension des frontières de la ville), en espace périurbain (plus ou moins mité) ou en espace rural plus lointain (et notamment touristique). Ainsi, déterminer s'il y a lieu de limiter l'extension des sols artificialisés et où, tout en préservant les services économiques et sociaux que ces sols apportent, ou de limiter les effets environnementaux de l'artificialisation, de l'urbanisation et de l'étalement urbain n'est pas une question simple. Les débats et controverses tant publiques que scientifiques sur ces questions sont intenses et difficilement réductibles au travers d'une Expertise scientifique collective. En revanche, l'analyse des leviers d'action qui visent ces différents objectifs est nécessaire pour en examiner les logiques (éventuellement contradictoires), les limites et les avantages que l'on peut en attendre.

Les politiques publiques ainsi que le droit chargé de leur mise en œuvre participent à la régulation de l'artificialisation des sols. Leur analyse montre le caractère imprécis et multiforme de la notion d'artificialisation. Fortement liée aux politiques d'aménagement du territoire, ce n'est que récemment que cette notion est devenue un enjeu pour l'Etat et les collectivités territoriales. Ces politiques ont un fort impact sur l'espace rural, mais aussi sur les villes et en particulier les profils socio-économiques des quartiers. A travers les différents éléments étudiés au fil de cette expertise, des leviers d'action se traduisant à la fois par des outils juridiques, des instruments fiscaux et des lignes politiques émergent. Aussi le présent chapitre se propose d'en faire la synthèse, mais aussi d'en donner une lecture juridique et fiscale. Il ressort de leur analyse que ces instruments répondent à trois objectifs différents, avec une ancienneté et un succès variables et dont l'organisation que nous proposons ici fait écho au triptyque bien connu de la doctrine juridique, qui est celui du mécanisme des études d'impact : le premier est celui d'éviter ou au moins de maîtriser l'artificialisation des sols (8.2), le deuxième est d'en réduire les impacts (8.3) tandis que le troisième, moins établi que les deux précédents, donne des perspectives de compensation de l'artificialisation des sols (8.4). En amont, sont présentées les voies juridiques et fiscales de l'artificialisation des sols (8.1).

8.1. Les voies juridiques et fiscales de l'artificialisation des sols

Un premier état des lieux révèle que, comme une conséquence de l'absence d'identification précise de l'objet « artificialisation », le droit et les politiques publiques (8.1.1) et la fiscalité (8.1.2) présentent des éléments qui, incitent directement ou indirectement à l'artificialisation, ou plus précisément, à l'urbanisation.

8.1.1. Les voies juridiques de l'artificialisation

L'artificialisation des sols est indissociablement liée à la propriété et au caractère souverain de celle-ci sur l'usage du bien. L'usage en est « libre » sous réserve du droit des tiers et pourvu qu'il n'en soit pas fait un usage contraire aux lois et règlements (Code civil, art. 544). Ce qui implique que si artificialisation il y a, c'est que soit il n'y a pas de réglementation qui s'y oppose, soit au contraire, que cette réglementation la favorise et qu'éventuellement, la réglementation est accompagnée de dispositifs financiers et fiscaux susceptibles d'avoir un impact sur les marchés immobiliers.

- **Le renforcement des règles contentieuses en faveur de l'urbanisation**

La volonté de renforcer le parc immobilier pour faire face aux besoins en logement a conduit à modifier sensiblement les règles contentieuses, afin soit de restreindre la capacité de recours des requérants contre un document ou une autorisation d'urbanisme, soit de permettre au juge de le/la régulariser. Pour l'essentiel :

Requérant, délais de recours et pouvoir de régularisation du juge :

- Le droit a évolué dans le sens de la restriction des possibilités de recours des associations. Désormais une association de protection de l'environnement ne peut former un recours contre une décision si celle-ci a été prise avant que l'association ait obtenu l'agrément qui atteste de son intérêt à agir. De même, l'action d'une association contre une décision d'urbanisme n'est recevable que si le dépôt de ses statuts est intervenu antérieurement à l'affichage de la demande du pétitionnaire.
- Alors que la simple condition de voisinage suffisait à fonder la recevabilité d'un recours, les conditions ont également été renforcées et le requérant devra démontrer en quoi il se trouve directement affecté.
- Le législateur a par ailleurs limité les délais de recours pour vice de procédure ou vice de forme des documents d'urbanisme à 6 mois, tout comme le juge dispose de pouvoirs croissants en matière de régularisation desdits documents ainsi que des permis de construire, ce qui lui permet d'éviter de plus en plus de les annuler (C. Urb. Art L. 600-9 et 5).

Restrictions à la démolition des constructions illégales :

Cette sanction reposait sur une annulation ou exception d'illégalité constatée par la juridiction, et dans un délai suffisamment long pour permettre l'exercice de l'action en démolition (cinq années), avec un point de départ de prescription accommodant (achèvement des travaux). A la suite des rapports "Pelletier" de 2005 et "Labetoule" de 2013, deux réformes vont complexifier ce régime et en limiter la portée. Désormais la démolition des constructions est limitée dans le temps (6 mois ou deux ans dans certains espaces protégés) et ses conditions sont encadrées de manière à limiter son recours.

- **La construction de logements : une contrainte pour les collectivités**

Certaines dispositions imposent la construction et partant, conduisent à l'artificialisation des sols. Le programme local de l'habitat (PLH) impose aux intercommunalités de conduire une politique locale de l'habitat en vue de répondre aux besoins de logements et en hébergement, et de favoriser la mixité sociale et le renouvellement urbain. Ce programme vise à équilibrer la répartition des "charges" de logements entre les communes de l'intercommunalité et partant, de répartir la charge d'artificialisation, si le terrain assiette du projet n'était pas déjà construit. Cela n'interdit pas, même si cela n'est pas formellement encouragé, les actions et les opérations de renouvellement urbain.

Quelques voies de réduction de l'artificialisation seraient envisageables, au prix de modifications mineures de ce programme : subordination des aides et subventions à une économie des sols, impliquant une recherche prioritaire de recyclage foncier et le versement d'un dossier établissant l'état de la question sur le territoire de la commune ou de l'intercommunalité ; priorité donnée aux opérations de renouvellements urbains, aux mêmes conditions de démonstration des disponibilités foncières.

Encadré 8-1 - L'absence de réglementation des résidences secondaires (les "lits froids")

Les résidences secondaires qualifient, selon la nomenclature INSEE, les logements utilisés pour les week-ends, les loisirs ou les vacances, ainsi que les logements meublés loués (ou à louer) pour des séjours touristiques **sur le littoral et en montagne** particulièrement (36,5% en Corse du Sud, 34% en Haute-Corse et dans les Hautes-Alpes, contre 10% de moyenne nationale). La réglementation ne permet cependant pas d'en limiter la construction, et moins encore d'interdire un usage secondaire à une construction qui aurait été édifiée à fins de résidence principale.

D'autres pays ont opté pour une solution plus radicale : l'interdiction de résidences secondaires une fois dépassé un certain ratio. C'est le cas en Suisse, à la suite de l'adoption de l'initiative Weber (Initiative populaire fédérale "pour en finir avec les constructions envahissantes de résidences secondaires"). Ainsi, la loi fédérale sur les résidences secondaires du 20 mars 2015 interdit leur construction dans les communes qui en comptent déjà plus de 20%, ou en compteraient plus de 20% si l'autorisation de construire demandée était octroyée.

- **L'effet incitatif des politiques publiques du logement sur les marchés immobiliers**

L'intervention de l'Etat en matière de logement vise à aider les ménages les plus modestes à se loger tout en soutenant la construction. Les dépenses directes de l'Etat en faveur du logement représentent environ 41 milliards d'euros soit près de 2 % du PIB (Comptes du logement 2015). Les études sur les impacts de ces mesures sont centrées sur leur efficacité à réduire les inégalités sociales, en particulier pour étudier si les ménages ou entreprises se relocalisent dans des zones ciblées. Elles ne portent pas sur le fait de participer ou non à l'étalement urbain. L'ensemble de ces évaluations met en lumière la difficulté à contrer les mécanismes à l'œuvre sur les marchés immobiliers et, en particulier, les dynamiques ségrégatives et l'étalement des villes.

L'impact de la loi SRU. La loi SRU de 2000 a l'objectif d'atteindre 20% de logements sociaux dans les agglomérations de plus de 50 000 habitants. Elle a eu un effet positif significatif sur la construction de logements sociaux croissant au cours du temps, avec une augmentation de la proportion de logements sociaux de 2,9 points entre 2000 et 2004 et de 6,6 points entre 2000 et 2008.

L'incitation à l'investissement locatif. Plusieurs dispositifs se sont succédés depuis la loi Méhaignerie en 1986 (tendant à favoriser l'investissement locatif, l'accession à la propriété de logements sociaux et le développement de l'offre foncière), avec l'objectif d'inciter des ménages à réaliser des investissements locatifs dans la construction neuve, en leur accordant des crédits d'impôts. La loi Scellier en 2009 exclut les zones denses les moins tendues du dispositif. Les études montrent que ces dispositifs n'auraient pas augmenté la production de logements mais auraient entraîné une augmentation des prix de 1% dans les territoires proches de la frontière entre les zones incluses et exclues du dispositif.

L'effet inflationniste des aides personnalisées au logement et la régulation des loyers. Les aides à la personne se sont fortement développées en France, notamment l'aide personnalisée au logement (APL). Si la construction n'augmente pas suffisamment suite à une hausse des aides au logement (faible élasticité-prix), alors les loyers ou les prix s'ajusteront à la hausse pour équilibrer l'offre et la demande. Ce sont donc les propriétaires qui dans ce cas profitent des aides. On parle d'effet inflationniste des aides. Sur les 40 dernières années, les loyers n'ont été fixés librement lors des nouvelles locations ou des renouvellements de bail que durant les années 1986 à 1989. Des études montrent l'impact négatif à long terme de l'encadrement des loyers sur l'entretien des logements et le développement de l'offre.

Les aides à l'accession à la propriété : l'effet du prêt à taux zéro (PTZ). Initialement réservé à l'achat de logement neuf, le PTZ est actuellement également ouvert à l'achat dans l'ancien avec travaux. Le PTZ a eu un effet inflationniste sur le prix des terrains. L'analyse de ces évolutions est menée en comparant l'évolution des prêts accordés et des prix des logements aux frontières entre différentes zones, suite à l'augmentation différenciée des montants de PTZ. Les résultats montrent que les conditions plus généreuses du prêt à taux zéro conduisent les banques à augmenter le volume des crédits accordés aux ménages, et qu'une grande partie de cette augmentation se traduit en hausse de prix.

Les politiques de subvention à des zones particulières. Les politiques ciblant certains territoires ont été développées pour faire face à d'importantes disparités territoriales. Les politiques de subvention à des zones particulières peuvent être importantes pour des cas particuliers – par exemple quand une population défavorisée ne peut pas déménager ou se déplacer et qu'il n'y a pas de travail dans ce territoire, il peut alors être justifié d'inciter financièrement à la mobilité des travailleurs – mais ces politiques sont généralement capitalisées dans les loyers et récupérées par les propriétaires.

Les gouvernements justifient généralement ce type d'interventions par des arguments d'équité, un argumentaire contredit par les économistes qui prônent des moyens plus directs (taxation des revenus plus progressive, allocation sur critères de ressources) pour diminuer les inégalités, et craignent les éventuels effets inflationnistes des politiques ciblées.

Pour favoriser l'installation d'entreprises dans les zones touchées par le chômage, des zones ont été définies et classées mais les études montrent que l'impact de ces programmes sur les créations d'entreprises et d'emploi est limité et temporaire au regard de leurs coûts importants. Toutefois, ces politiques sont plus efficaces lorsque les zones concernées ont une bonne accessibilité.

8.1.2. Les voies fiscales de l'artificialisation

• La fiscalité foncière : les éléments du débat en France

Les actifs immobiliers représentant plus de la moitié du patrimoine des Français, toute réflexion relative à des aménagements de la fiscalité foncière entre dans le débat plus large d'une fiscalité optimale du patrimoine intégrant ses effets incitatifs et distorsifs sur d'autres actifs ou sources de revenu. En France, les quelques réflexions et inflexions sur le sujet sont fortement marquées par un contexte de tensions sur le marché du logement. La priorité est alors de repenser la fiscalité dans un objectif de recherche de l'équité fiscale et de fluidification de ce marché en donnant les bonnes incitations pour que diminuent les phénomènes de rétention et qu'augmentent les mises sur le marché de terrain constructibles.

La rétention de terrains constructibles est encouragée par une taxe assise sur des valeurs locatives cadastrales historiques des terrains qui, même majorées annuellement, sont très fortement sous-évaluées par rapport à leur valeur de marché. La faible imposition confère à l'investissement dans un terrain nu une grande valeur d'attente poussant l'investisseur à reculer sa mise en vente pour construction avec l'anticipation d'une hausse de prix.

Encadré 8-2 - Fiscalité foncière et taille de la ville : les prédictions théoriques et les résultats empiriques

L'impact d'une taxe foncière sur la taille des villes peut se décomposer en deux effets opposés sur l'étalement urbain. Une augmentation d'une part, exerce un impact négatif sur l'intensité du développement foncier, ce qui encourage l'étalement urbain, et d'autre part, accroît le coût du logement au mètre carré et réduit de ce fait la demande de logement en termes d'espace. Cette diminution de la taille du logement engendre un accroissement de la densité de population et donc une diminution de la taille de la ville. L'effet net d'une augmentation de l'impôt foncier est donc ambigu, mais la tendance confirmerait que l'augmentation de la taxe foncière accentue l'étalement.

La loi SRU a donné droit aux communes d'appliquer une majoration optionnelle de la taxe foncière sur le foncier non bâti. Les communes qui s'en sont saisies ont en moyenne appliqué une majoration très modeste, donc sans impact réel sur les comportements. La loi de finances pour 2013 a systématisé et renforcé la portée de la majoration de la taxe foncière sur les propriétés non bâties des terrains constructibles prévue à l'article 1396 CGI dans les zones où les tensions immobilières sont les plus fortes. Il s'agit d'inciter à la libération du foncier et la construction de logements. Ainsi, dans les communes soumises à la taxe annuelle sur les logements vacants, la valeur locative cadastrale des terrains constructibles, après abattement de 20%, est majorée de 25% de son montant et d'une valeur forfaitaire fixée à 10 €/m² pour les impositions dues au titre de l'année 2016 et des années suivantes. Le dispositif de majoration obligatoire dans les zones les plus tendues initié en 2012 a souffert d'un défaut de calibration, et sa révision en 2016 revient à un niveau plus faible dont on peut douter qu'il change les comportements.

Dans les communes non soumises à la taxe annuelle sur les logements vacants, la valeur locative cadastrale des terrains constructibles situés dans les zones urbaines ou à urbaniser, lorsque les voies publiques et les réseaux existants à la périphérie de la zone à urbaniser ont une capacité suffisante pour desservir les constructions à implanter dans l'ensemble de cette zone, peut être majorée pour le calcul de la part revenant aux communes et aux établissements publics de coopération intercommunale sans fiscalité propre.

Cependant une réforme de la taxation des stocks doit s'accompagner d'une réforme de la taxation des flux. Autrement dit, la fluidité du marché ne peut être retrouvée que si les transactions de terrains constructibles sont moins lourdement taxées. Cela peut passer entre autres par un abaissement du taux d'imposition des plus-values immobilières de cessions de terrains à bâtir, la suppression des abattements fondés sur des détentions longues et la suppression des droits de mutation à titre onéreux.

Encadré 8-3 - Incitation économique pour l'installation des entreprises

L'artificialisation des sols peut être favorisée par les collectivités territoriales qui cherchent à inciter les entreprises industrielles et commerciales à s'implanter sur leur territoire, en jouant, lorsqu'elles en ont la possibilité, sur l'une des 70 impositions qui composent la fiscalité locale des entreprises, en particulier sur la contribution économique territoriale. Sans compter la mise à disposition de terrains à l'euro symbolique (les libéralités envers les personnes privées sont interdites, mais une vente à très faible coût peut trouver une contrepartie, selon le Conseil d'Etat, dans la création d'emplois). Un rapport du Conseil des prélèvements obligatoires de 2014 sur la fiscalité locale et les entreprises a cependant mis en évidence le fait que la fiscalité locale ne constitue qu'un critère parmi beaucoup d'autres dans les choix d'implantation des entreprises : l'attractivité d'un territoire résulte surtout de son environnement économique et de la disponibilité de l'offre foncière. Ce qui implique une artificialisation que la collectivité peine à maîtriser, au risque de perdre l'implantation des entreprises sur son territoire.

• Imposition de la propriété foncière et taxe d'aménagement

Dans la plupart des pays développés, la taxe sur la propriété immobilière résulte d'une combinaison entre la valeur du foncier et celle du bâti, imposée à un taux unique. L'investissement en capital immobilier étant élastique à son prix, il n'existe a priori aucune raison, sinon pratique, de l'imposer au même taux que le foncier sur lequel il repose. La pratique du taux unique entre le foncier et le bâti pourrait être remise en cause : l'imposition du foncier à un taux plus élevé que le bâti devrait encourager des constructions plus denses, sur des tailles de lots plus petites, et modérer ainsi l'étalement urbain.

La taxe d'aménagement concerne les opérations d'aménagement et les opérations de construction, de reconstruction et d'agrandissement des bâtiments, installations ou aménagements de toute nature soumises à un régime d'autorisation en vertu du Code de l'urbanisme. Elle est régulièrement présentée comme une incitation fiscale capable de réguler l'artificialisation des sols. Une étude (2004) consacrée à 29 communes proches de Chicago suggère que la mise en place d'une telle taxe est associée à une diminution du taux de construction résidentielle de 25% à 30%. D'autres aboutissent à des résultats plus contrastés s'agissant de l'Etat de Floride. Aucun impact sur le taux de construction dans les villes-centre, périphériques ou se situant dans des zones rurales n'est identifié. Enfin, une autre étude, sur la métropole d'Albuquerque, conclut à un effet de réduction des constructions à la frange urbaine et de croissance dans les zones proches des centralités.

En France, cette taxe a été instituée en 2010 et est assise sur la valeur de la surface de construction. Nonobstant l'exonération de certaines constructions en fonction de leur affectation, et un abattement de 50% en fonction des caractéristiques de certains locaux, le taux de la part communale ou intercommunale de la taxe d'aménagement peut être augmenté jusqu'à 20% dans certains secteurs par une délibération motivée, si la réalisation de travaux substantiels de voirie ou de réseaux ou la création d'équipements publics généraux est rendue nécessaire en raison de l'importance des constructions nouvelles édifiées dans ces secteurs. Ainsi configurée, cette taxe incite peu à la réduction de l'utilisation de surface au sol, puisqu'elle a été instituée en vue de participer au financement des équipements publics de la commune.

Certaines adaptations seraient envisageables pour lui donner un caractère incitatif en vue de réduire l'utilisation des sols :

- L'introduction d'une variabilité de la taxe d'aménagement en fonction d'indices de qualité du sol ou de disponibilité du sol;
- Une modulation de la taxe selon que le projet concerne ou non un terrain antérieurement non bâti, de façon à renchérir le coût des projets sur les terrains vierges. Cette solution peut s'accompagner d'une diminution de la taxe dans les centres urbains et parcelles aménagées.

Deux écueils sont à éviter cependant : un taux trop faiblement incitatif (mais un taux élevé peut ne pas avoir d'effet sur les constructeurs disposant d'une capacité financière suffisante) et la tentation du revenu pour les communes, sauf dans ce cas à prévoir soit une affectation particulière en lien avec son objet, soit l'affectation à une autre personne publique.

- Une exonération de la taxe en cas de recyclage foncier, une sorte de "récompense" fiscale en faveur du constructeur qui procéderait à une reconstruction après démolition ou après dépollution d'un terrain, évitant d'aller artificialiser un autre terrain ailleurs.

8.2. Des leviers pour éviter ou maîtriser l'artificialisation des sols

En tentant de limiter le morcellement des terres agricoles et de contrôler l'étalement urbain, les politiques publiques ainsi que leur traduction juridique et fiscale présentent un ensemble d'outils de maîtrise de l'artificialisation des sols, sans nécessairement identifier précisément cet objectif. Même si la maîtrise de l'artificialisation n'est pas un objectif juridique affirmé et général, le droit présente des outils, dont la régulation de l'affectation des sols par le droit de l'urbanisme, à l'aide de documents de planification et de mécanismes d'autorisation.

L'affectation de l'occupation des sols par des mécanismes de zonage vient répartir l'usage des sols sur le territoire et semble s'imposer comme l'outil le plus à même d'éviter l'artificialisation des sols, bien que la pratique en révèle de nombreuses limites (8.2.1). Le droit comme la fiscalité s'avèrent plus efficaces, du moins mieux définis, lorsqu'ils ont vocation à s'appliquer à des espaces particuliers tels que l'espace rural ou le littoral (8.2.2). Enfin, l'objectif de densification, poursuivi par le droit, est un moyen de limiter l'artificialisation des sols, bien que ses effets bénéfiques d'un point de vue spatial doivent être mis en balance avec les impacts environnementaux qui en découlent (8.2.3).

8.2.1. Le zonage : un outil efficace pour éviter localement l'artificialisation des sols

Les zonages, issus principalement du droit de l'urbanisme et du droit de l'environnement, servent à répartir les usages sur un territoire, mais aussi à contrôler les densités résidentielles et le marché foncier. Ils sont la traduction dans l'espace de documents de planification multiples et dont l'articulation est organisée soit à travers un rapport de compatibilité, soit un rapport de prise en compte (Figure 8-1). Ils servent également de support à des politiques de taxation différenciées dans l'espace, etc. Les objectifs du planificateur, derrière l'utilisation d'un type de zonage plutôt qu'un autre, sont donc complexes et ne présument pas de la volonté exclusive de limiter l'étalement urbain.

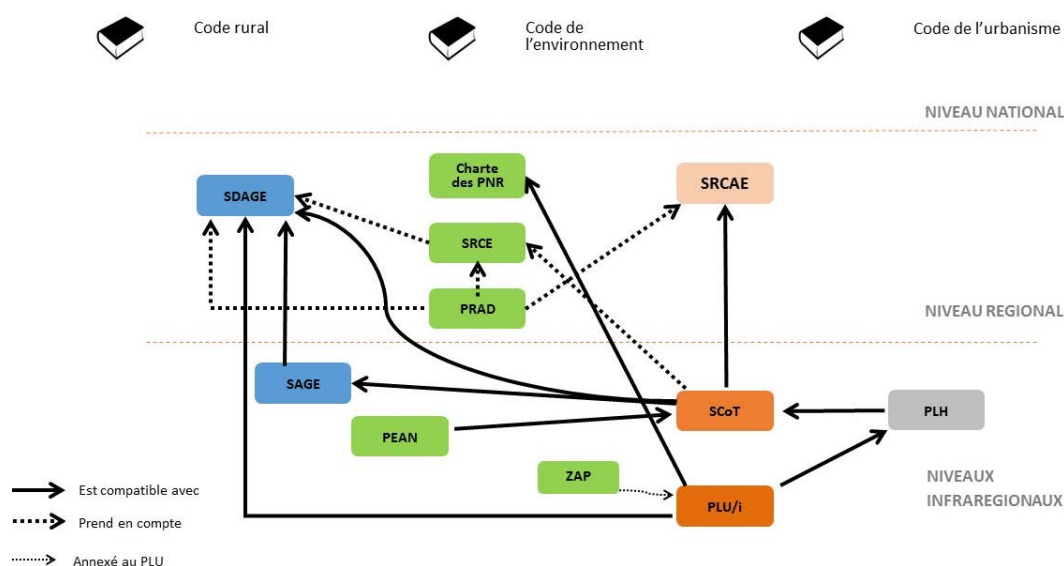


Figure 8-1 Les rapports de compatibilité et de prise en compte des principaux documents de planification (PEAN : périmètres de protection et de mise en valeur des espaces agricoles et naturels périurbains ; PNR : parc naturel régional ; PLH : plan local de l'habitat ; PLUi : plan local d'urbanisme intercommunal ; PRAD : plan régional d'aménagement durable ; SAGE : schéma d'aménagement et de gestion des eaux ; SCOT : schéma de cohérence territoriale ; SDAGE : schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux ; SRCAE : schéma régional climat air énergie ; SRCE : schéma régional de cohérence écologique ; ZAP : zone agricole protégée)

Entre l'outil juridique et l'application politique, l'efficacité des zonages à éviter l'artificialisation des sols dépend fortement de la gouvernance. D'un côté la décentralisation permet un échelon de gouvernance locale plus proche des réalités territoriales, tandis que d'un autre côté il expose le décideur à des pressions et à des ambitions qui peuvent remettre en cause l'efficacité ou la pertinence du zonage.

• Les zonages empêchent-ils l'urbanisation ?

Les dispositions évitant l'étalement urbain sont en concurrence certaine avec celles qui doivent permettre l'occupation des sols, mues par d'autres impératifs. C'est à cette fin que la limite au contrôle de l'artificialisation des sols par le principe de construction en continuité est marquée par l'existence d'un plan local d'urbanisme ou d'une carte communale, qui peut délimiter les hameaux et groupes de constructions traditionnelles ou d'habitations existants en continuité desquels il prévoit une extension de l'urbanisation, en prenant en compte les caractéristiques traditionnelles de l'habitat, les constructions implantées et l'existence de voies et réseaux (L. 122-6). En outre, ces dispositions sur la continuité ne s'appliquent pas lorsque le SCOT ou le PLU comporte une étude justifiant, en fonction des spécificités locales, qu'une urbanisation qui n'est pas située en continuité de l'urbanisation existante est compatible avec le respect des objectifs de protection des terres agricoles, pastorales et forestières, avec la préservation des paysages et milieux caractéristiques du patrimoine naturel et la protection contre les risques naturels.

Les zonages dits d'exclusion strictement non constructibles (y compris les UGB) limitent l'urbanisation. En France, seuls les zonages environnementaux stricts (équivalent aux catégories I à IV de l'UICN²⁴) assurent une absence de nouveaux logements à 10 ans. En matière d'urbanisme, les PLU/PLUI doivent respecter le rapport de compatibilité avec des documents d'urbanisme qui leur sont supérieurs, tels les Schémas de cohérence territoriale (SCOT), ce qui limite les possibilités. En revanche, certains seront plus restrictifs que d'autres et au final, le juge administratif contrôlera éventuellement simplement que l'intercommunalité aura respecté le principe de l'équilibre entre ses aspirations de développement et les différents objectifs (environnementaux, sociaux, etc.) qui lui incombent.

Par ailleurs, certaines études établissent que les politiques de zonage ont un impact direct sur l'offre immobilière (disponibilité et prix) et peuvent engendrer des bâtis plus denses s'il n'y a pas de limite de densité. L'exemple des Greenbelts (cf. Chapitre 5) montre que ces ceintures peuvent aussi repousser au-delà l'urbanisation. L'efficacité dans le temps de ces politiques est ambiguë car locales et on observe une accélération potentielle des constructions en zone périurbaine. Généralement, les meilleurs résultats en termes de régulation de constructions nouvelles découlent d'un zonage rigide, accompagné d'un système efficace de contrôle.

Le fait que le zonage puisse être utilisé pour plafonner la densité des zones constructibles limite son efficacité à réguler l'artificialisation des sols. En effet, une libre expression du marché conduirait à plus de densification des espaces constructibles. Une fois qu'un territoire est artificialisé, la question est de savoir si cette densité doit être contenue ou augmentée, mais tout en contraignant la frange pour éviter l'extension de l'artificialisation. La densité doit alors être analysée puisque des effets de seuils existent. Le transfert du droit à bâtir (Chapitre 6 et infra) pourrait être utilisé pour augmenter localement les densités, de même qu'un rééquilibrage des taxes foncières (à augmenter) et d'habitation (à baisser).

Encadré 8-4 - La décentralisation fiscale

La plupart des pays de l'OCDE se caractérisent par une forte fragmentation administrative²⁵ au niveau local. Dès lors que cette fragmentation juridictionnelle se couple à une décentralisation fiscale et à une absence de gouvernance économique coordonnée, les conditions sont réunies pour que s'installe une concurrence. Cette dernière est naturellement exacerbée lorsque les autorités locales disposent d'un pouvoir d'imposition sur les entreprises, lié ou non à la valeur foncière utilisée.

En Italie, la décentralisation de l'impôt sur le foncier (ICI) a incité les gouvernements locaux à accroître (et non réduire) les permis de construire afin d'élargir leur base fiscale et de compenser la diminution concomitante des transferts de l'Etat. En d'autres termes ici, l'attribution de l'impôt foncier aux communes autorise l'usage d'une planification foncière accommodante comme variable d'ajustement budgétaire. Confier à une même autorité locale le pouvoir de taxation et de régulation foncière, ce qui revient à pouvoir définir la base fiscale, peut engendrer un surcroît de constructions nouvelles.

Le zonage peut avoir un effet sur les prix, mais ce n'est pas clairement établi. Il est nécessaire de distinguer l'offre foncière de l'offre de bâtiments et dans la même mesure, le foncier artificialisé du nombre de bâtiments qu'il permet de générer. Théoriquement, en contraignant l'offre immobilière, les politiques de zonage ont un effet négatif sur le nombre de constructions

²⁴ Six catégories d'aires protégées ont été définies par l'UICN. Elles correspondent à une gradation des interventions humaines dans les milieux naturels, depuis l'exclusion de toute activité jusqu'à des stratégies de gestion durable de la biodiversité : (I) Réserve naturelle intégrale ou zone de nature sauvage ; (II) Parc national ; (III) Monument ou élément naturel ; (IV) Aire de gestion des habitats ou des espèces ; (V) Paysage terrestre ou marin protégé ; (VI) Aire protégée pour l'utilisation durable des ressources naturelles.

²⁵ En effet, dans les pays de l'OCDE, les métropoles de plus de 500 000 habitants comprennent 74 municipalités en moyenne.

nouvelles, mais les propriétaires fonciers peuvent anticiper le changement de réglementation en subdivisant leurs parcelles ou en négociant avec les décideurs. Si le zonage ne prévoit pas de limitation de la densité de construction, l'augmentation des prix peut alors conduire à des formes de bâti plus denses.

La question du lieu n'est pas assez étudiée : il ne s'agit pas d'interdire les constructions nouvelles dont la France a un besoin réel, mais de bien choisir les lieux pour contenir l'étalement et le faire en concertation plutôt qu'en compétition entre communes voisines.

• Gouvernance de l'artificialisation et évolution des zonages

La tendance est au groupement de communes et à l'articulation de leur urbanisation autour des SCOT, limitant dans le même temps la possibilité, pour celles qui y renonceraient, d'ouvrir à l'urbanisation les zones naturelles et les zones d'urbanisation future. Un jeu de critères de distance, de population agglomérée et de diverses considérations géographiques limite toutefois ce régime.

La loi ALUR rénove le mécanisme en lui donnant une autre philosophie : éviter l'étalement urbain dans les communes qui ne sont pas couvertes par un SCOT (dont tiennent lieu, dans le cadre de ce dispositif, les schémas d'aménagement des régions d'outre-mer, le SDRIF (cf. Chapitre 6) et le plan d'aménagement et de développement durable de Corse).

Sont concernées par une restriction d'ouverture à l'urbanisation : les zones à urbaniser d'un PLU délimitées après le 1^{er} juillet 2002 ; les zones naturelles, agricoles ou forestières dans les communes couvertes par un PLU et les secteurs non constructibles des cartes communales. En outre, en l'absence de document d'urbanisme, les secteurs situés en dehors des parties actuellement urbanisées des communes ne peuvent être ouverts à l'urbanisation pour autoriser *"les constructions et installations incompatibles avec le voisinage des zones habitées et l'extension mesurée des constructions et installations existantes"*, non plus que les constructions ou installations que le conseil municipal peut approuver dans l'intérêt de la commune. Enfin, dans les communes qui ne sont pas couvertes par un SCOT, aucune autorisation d'urbanisme commercial ni d'exploitation d'un établissement de spectacles cinématographiques ne peut être délivrée à l'intérieur d'une zone ou d'un secteur rendu constructible après l'entrée en vigueur de la loi Urbanisme et habitat du 2 juillet 2003.

Les déterminants des changements des zonages expliquent la dynamique de l'étalement urbain. La dynamique d'étalement urbain répond à deux cas de figure :

Dans le premier, les zonages sont extrêmement influencés à moyen terme par les préférences des individus, mais à long terme on peut s'appuyer principalement sur les déterminants des conversions résidentielles et des prix pour expliquer l'étalement urbain. Dans le second cas, à l'inverse, si les gouvernements locaux pilotent l'urbanisation en privilégiant des objectifs d'intérêt public dépassant leur simple réélection et s'affranchissent de la pression des propriétaires et des aménageurs, alors les zonages suivent des dynamiques propres.

En zone rurale, ces évolutions se font principalement par extension des zonages avec une forte dépendance au réseau routier secondaire existant. En outre, l'échelle de décentralisation est cruciale : plus elle est élevée, plus elle va permettre aux lobbys locaux d'influencer les zonages et plus elle va générer des compétitions entre gouvernements locaux pour attirer certains emplois et ressources fiscales. Ce phénomène s'observe en France aussi bien en zone périurbaine qu'en zones de déprise agricole. En réaction, plusieurs lois françaises (SRU 2000, Grenelle II 2010, ALUR 2014) ont amorcé un mouvement de recentralisation : la mise en place des SCOT répond à cette logique et plus encore les PLUi.

8.2.2. Eviter l'artificialisation de certains espaces particuliers

De nombreuses dispositions permettent de protéger les sols contre l'artificialisation, certains espaces étant mieux protégés que d'autres, notamment lorsqu'ils sont le support de productions. La prise en compte des particularités des sols dans le cadre des documents d'urbanisme peut permettre une artificialisation "raisonnée", et faute de pouvoir toujours l'éviter dans le cadre d'une anticipation reposant sur les évaluations environnementales, il faut se résoudre à en compenser les effets (cf. infra).

• La protection des espaces de montagne et littoraux contre l'artificialisation des sols

Outre le cas particulier des espaces protégés (parcs nationaux, réserves naturelles...), le droit de l'urbanisme permet de protéger certains espaces, dont les zones de montagnes et en particulier les terres nécessaires au maintien et au développement des activités agricoles, pastorales et forestières (C. urb., art. L. 122-9). Paradoxalement, la protection de ces activités autorise la consommation d'espaces agricoles, puisque restent autorisables *"les constructions nécessaires à ces activités"*, mais également les équipements sportifs (ski), outre *"la restauration ou la reconstruction d'anciens chalets d'alpage ou de bâtiments d'estive"*, ainsi que des extensions limitées *"lorsque la destination est liée à une activité professionnelle saisonnière"*.

Les pays développés, mais aussi les pays émergents de façades littorales particulièrement convoitées, telles que les rives de la Méditerranée, se sont dotés de législations spécifiques au littoral. Elles reposent sur la mise en œuvre de principes similaires : la délimitation de zones *non aedificandi* (*non constructibles*), la construction perpendiculairement au littoral (dite "en profondeur"), et la protection de corridors verts notamment par la définition d'espaces remarquables. En France, la loi Littoral de 1986 est venue inscrire ces principes dans le droit de l'urbanisme, mais ses effets restent mitigés (cf. infra). Cette loi a également créé le mécanisme de protection des espaces dits « remarquables » en en restreignant l'usage et en préservant leur harmonie et leur intégration paysagère.

L'urbanisation autour des plans d'eau. Les parties naturelles des rives des plans d'eau naturels ou artificiels d'une superficie inférieure à mille hectares sont protégées sur une distance de 300 m à compter de la rive ; y sont interdits toutes constructions, installations et routes nouvelles ainsi que toutes extractions et tous affouillements (L. 122-12 – pour les plans d'eau de plus de 1 000 ha, c'est la loi Littoral qui s'applique, la distance étant alors réduite à 100 m). Toutefois, la faible importance du plan d'eau peut justifier la non-application de ce dispositif. Certaines constructions sont cependant admises dans ces secteurs, liés à la production agro-sylvo-pastorale ou aux activités des lieux (gîtes, camping, équipements d'accueil et de sécurité...) (L. 122-13). D'autres constructions et aménagements peuvent être admis par dérogation, en fonction des spécificités locales.

L'extension limitée de l'urbanisation des espaces proches des rives des plans d'eau intérieurs soumis à la loi Littoral est justifiée et motivée dans le plan local d'urbanisme, selon des critères liés à la configuration des lieux ou à l'accueil d'activités économiques exigeant la proximité immédiate de l'eau.

Les territoires ultramarins sont soumis aux mêmes lois que la métropole (loi Littoral, loi Paysage...), tout en étant adaptées d'un point de vue des compétences, mais la difficulté réside dans leur application aux particularismes locaux, sociaux et environnementaux. C'est le cas à Mayotte, où coexistent dans la législation foncière, des droits coutumiers musulmans et le droit commun, aux logiques en partie contradictoires. Il en est de même en Nouvelle-Calédonie. Plus généralement dans les territoires ultramarins, les principes réglementaires de la bande de 100 mètres de la loi Littoral se superposent à ceux de la zone des 50 pas géométriques (81,2 m), qui connaît des spécificités législatives, naturelles et des enjeux socioéconomiques et patrimoniaux particuliers.

Ces dispositifs s'appliquant au littoral ont souvent été mis en place trop tardivement (parfois du fait de défaillances politiques et institutionnelles) au regard des dynamiques rapides et largement spontanées de l'artificialisation. Par ailleurs, les outils restent souvent au service de la promotion du développement économique plutôt que de la protection de l'environnement. Un bilan de la loi Littoral publié en 2007 faisait un constat mitigé de son application. S'il ne remettait pas en cause la légitimité d'une politique spécifique au littoral, bien au contraire, ce bilan pointait des défaillances dans son application et appelait à un renouveau de certaines dispositions. De nombreuses tensions existent autour de cette thématique entre les différents acteurs et 10 ans après ce bilan, et la réforme de la loi littoral est un levier d'action en faveur de la protection du littoral contre l'artificialisation.

Encadré 8-5 - Pour une politique intégrée du littoral : la Gestion intégrée des zones côtières (GIZC)

La GIZC est un outil de politique publique, que le Conseil de l'Europe porte depuis les années 1970. Elle a notamment fait l'objet d'une recommandation de l'Union européenne en 2002, mais force est de constater que sa mise en œuvre n'est toujours pas effective. La GIZC permettrait pourtant de composer avec les réglementations sectorielles qui s'appliquent sur le littoral en appréhendant globalement les éléments terrestres et aquatiques, et en prenant en compte l'exploitation des ressources avec les objectifs de protection de l'environnement. De fait, si la GIZC vise à répondre aux principes du développement durable, elle peine à se concrétiser du fait des profondes divergences d'intérêts entre les usagers du littoral, mais également de la dispersion des compétences institutionnelles (situées à des échelles territoriales multiples) et de la dilution des responsabilités qui en découle.

• La protection relative des sols supports de production agricole

Le droit aspire à préserver l'existence des sols à vocation agricole dans une perspective quantitative plus que qualitative, en d'autres termes la disponibilité des sols.

Dans les PLU peuvent être classées en zones agricoles dites "zones A" les secteurs de la commune, équipés ou non, "à protéger en raison du potentiel agronomique, biologique ou économique des terres agricoles". L'utilisation des sols doit donc correspondre à la vocation de la zone, et les autorisations de construire ou d'occuper le sol doivent respecter les dispositions du règlement de zone qui préserve cette vocation. Ce zonage a également des incidences sur les conditions de remise en état des sols à la suite de l'exploitation d'une installation classée. Cette protection de la disponibilité de sols à vocation agricole passe également par l'intervention des instances agricoles et assimilées lors de la définition du zonage par la commune ou l'intercommunalité : la Chambre d'agriculture est consultée dans le cadre de l'élaboration du SCOT ou du PLU, et le préfet peut désigner la direction départementale de l'équipement et de l'agriculture au titre des personnes publiques associées.

L'approbation du PLU et son évolution (modification/révision/mise en compatibilité) ne peuvent également intervenir, lorsqu'elles se traduisent par une réduction des terres agricoles et forestières, qu'après avis de la Chambre d'agriculture, du Centre régional de la propriété forestière et, le cas échéant, de l'Institut national de l'origine et de la qualité (INAO) dans les

zones d'appellation d'origine contrôlée. Il ne s'agit cependant que d'une simple consultation. L'absence de document d'urbanisme opposable ne laisse pas le sol sans défense, puisque la règle de la constructibilité limitée interdit de construire en dehors des parties actuellement urbanisées de la commune, à quelques exceptions près comme les constructions et installations nécessaires à l'exploitation agricole et à la mise en valeur des ressources naturelles. En outre, l'autorité compétente pour délivrer le permis de construire peut refuser le projet ou ne l'accepter que sous réserve de prescriptions spéciales s'il est de nature, par sa localisation ou sa destination, à compromettre les activités agricoles ou forestières, notamment en raison de la valeur agronomique des sols ou de l'existence de terrains faisant l'objet d'une délimitation au titre d'une appellation d'origine contrôlée ou d'une indication géographique protégée.

Ces avis et autres consultations n'offrent cependant qu'un faible rempart face au changement d'affectation. La protection des terres agricoles doit donc passer par des mécanismes *ad hoc*. Ainsi en est-il des zones agricoles protégées (ZAP), qui relèvent de la compétence du préfet : dès qu'un changement d'affectation ou de mode d'occupation du sol altérant durablement le potentiel agronomique, biologique ou économique d'une telle zone est envisagé, l'avis de la Chambre d'agriculture et de la Commission départementale d'orientation de l'agriculture est requis, et il faut une décision motivée du préfet pour autoriser ce changement en cas d'avis défavorable de l'une d'elles (C. rur., art. L. 112-2). Ce régime permet donc de dépasser un horizon économique de court terme et de contrer la pression locale exercée sur les élus. La politique des zones agricoles protégées est cependant très peu appliquée.

L'espace agricole périurbain bénéficie de mesures particulières de préservation depuis 2005 (Loi relative au développement des territoires ruraux). Les départements peuvent délimiter des périmètres de protection autour des espaces agricoles et naturels périurbains (PEAN) avec l'accord de la ou des communes concernées ou des établissements publics compétents en matière de PLU, après avis de la Chambre d'agriculture et enquête publique. L'intérêt du dispositif est que les terrains compris dans un périmètre défini ne peuvent être inclus ni dans une zone urbaine ou à urbaniser, ni dans un secteur constructible délimité par une carte communale, et que toute modification du périmètre ayant pour effet d'en retirer un ou plusieurs terrains ne peut intervenir que par décret. Une telle protection reste fragile, car dépendant du bon vouloir du Conseil départemental, et a un champ d'application assez flou : le terme "périurbain" ne permet pas d'identifier clairement ces espaces. On peut sans doute se fonder sur les aires urbaines de l'INSEE mais, pour certains départements, cette approche est réductrice et n'englobe pas toutes les zones de pression foncière.

Les politiques alimentaires et agricoles locales réinterrogent l'usage des outils de planification. La protection de l'agriculture périurbaine *via* des instruments de planification librement mobilisés par les communes, serait plus efficace que les PLU, notamment car ils signalent une gouvernance locale mobilisée autour d'un projet agri-urbain de développement agricole qui se traduit, ensuite, par une volonté de protection du foncier agricole. Cette mobilisation est un puissant levier juridique de protection des exploitations périurbaines, à condition qu'il intègre l'agriculture existante sur les territoires dans sa dimension multifonctionnelle.

• Préserver le foncier agricole par des outils fiscaux

Les éléments de réforme fiscale mentionnés précédemment visent avant tout à répondre aux difficultés d'accès aux logements en France, et non pas directement à une meilleure maîtrise de l'usage des zones naturelles et agricoles. Toutefois, l'atteinte du premier objectif peut servir celle du second.

Au bénéfice d'une fiscalité plus incitative, la mise sur le marché d'un plus grand nombre de terrains constructibles dans les zones urbaines ou d'urbanisation future peut diminuer la pression foncière dans des communes principalement couvertes par des zones naturelles et agricoles. Cet enchaînement vertueux n'est possible que si les communes concernées appliquent une politique rigoureuse de préservation des espaces naturels et agricoles et que ces zones bénéficient d'une fiscalité fortement accommodante par une sectorisation des taux basée sur l'usage des sols (Comité pour la fiscalité écologique, 2013). On peut en effet craindre que dans des communes aux marges des espaces urbains, une fiscalité sur le foncier agricole assise sur la valeur vénale des terrains accélère les demandes de déclassement en terrains constructibles en raison du surcoût fiscal supporté par les exploitants. Dans un contexte où les collectivités pourraient voir dans le nouveau mode d'imposition une aubaine en termes de finances publiques, des effets pervers d'incitation à l'artificialisation pourraient alors apparaître.

En France, la loi de modernisation de l'agriculture et de la pêche (2010) a instauré la taxe sur la plus-value immobilière assise sur la cession de terrains nus agricoles rendus constructibles à la suite d'une modification des documents d'urbanisme. Elle vise à lutter contre la spéculation sur le foncier agricole et, de ce fait, contre la disparition des terres agricoles, d'autant que son produit est affecté au financement des mesures en faveur de l'installation des jeunes agriculteurs.

Cette taxe est applicable de plein droit sur la première cession à titre onéreux de terrains nus rendus constructibles postérieurement au 13 janvier 2010, par un PLU ou une carte communale. Les cessions postérieures ne sont donc pas concernées par cette taxe, ce qui à terme en limite son efficacité.

Encadré 8-6 - La valorisation du foncier agricole aux Etats-Unis

Le gouvernement américain a autorisé les gouvernements locaux à appliquer une valeur d'usage aux terrains, c'est-à-dire qui reflète le revenu tiré de leur utilisation courante. Théoriquement, la taxation de la valeur d'usage permet de retarder la conversion du foncier agricole, et son effet est d'autant plus important que la différence entre les valeurs potentielles de marché et d'usage est elle-même élevée. Autrement dit, l'effet modérateur sur l'artificialisation va naturellement être maximum en périphérie proche des zones urbaines, là où cet écart est le plus grand, mais modeste en zones rurales loin des centralités urbaines.

Cependant, compte tenu des écarts de valorisation des terrains entre usages agricole et résidentiel à proximité des zones urbaines tendues, toute incitation fiscale en faveur d'un maintien agricole serait insuffisante pour modifier les comportements (The Mirrlees Review, 2011). Ces éléments ne plaident pas pour un abandon de tout traitement fiscal différencié des terres agricoles et naturelles. Ils soulignent simplement que l'incitation fiscale est à effets limités sans une politique de zonage ou de régulation stricte de la part des collectivités.

8.2.3. Densifier les espaces déjà artificialisés : une volonté affirmée, des effets bénéfiques relatifs

L'artificialisation des sols procédant souvent de façon rampante, par étalement, la voie de la densification esquissée par la loi "Solidarité et renouvellement urbains" a trouvé son prolongement avec la loi ALUR du 24 mars 2014, qui permet de libérer la densité et l'espace urbains, de renforcer l'encadrement de la densification, et de prendre ainsi place à côté d'incitations fiscales à la densification. Cela étant dit, la densification entraîne des impacts sur la biodiversité et des nuisances pour l'homme qui doivent être pris en compte par les politiques d'aménagement. Les effets seuils de la densité urbaine mis en évidence par les études focalisées sur les espèces et groupes d'espèces devraient davantage être intégrés dans les propositions qui insistent surtout sur la limitation de l'étalement urbain. Cette politique de limitation de l'étalement urbain, qui a maints avantages (limiter les pertes en terres agricoles et forestières, diminuer l'impact carbone des villes en réduisant les déplacements), devrait être accompagnée de mesures spécifiques destinées à limiter ou à compenser par des aménagements spécifiques les effets environnementaux négatifs (cf. chapitres 2 et 3) de la densification urbaine dans le cœur des agglomérations.

• L'impact de l'étalement urbain sur les dépenses publiques locales et la fiscalité

L'étalement urbain rend le financement des infrastructures plus coûteux car les économies d'échelle liées à la densité disparaissent au fur et à mesure que la taille de la ville s'accroît. Le financement de ces nouveaux aménagements urbains sont parfois couverts par des transferts de l'Etat ou par des revenus exceptionnels générés par le cycle immobilier (permis de construire, taxes sur la construction, recettes tirées de la vente de terrains publics...). Toutefois, le problème du financement des infrastructures se pose de manière générale pour le contribuable marginal ou moyen car l'étalement urbain favorise l'arrivée de nouveaux ménages qui ne paient pas le coût complet de leur installation. De nombreux travaux montrent que le développement urbain conduit ainsi à une allocation inefficace des investissements publics locaux.

• La libération de la densité et de l'espace urbains par la loi ALUR

La mesure de la densité urbaine s'est faite pendant longtemps à l'aune du coefficient d'occupation des sols (COS), mesure facile à mettre en place et à calculer, mais réductrice des facultés d'occuper le sol. Or, s'il permet de définir la densité maximale admissible sur un terrain donné par application d'un ratio rapporté à la surface du terrain, le COS limite dans le même temps cette densité ; il impose par conséquent de rechercher ailleurs les capacités de construire nécessaires à un projet, d'autant plus s'il est faible et qu'il restreint ainsi la densification des terrains concernés. La loi ALUR a donc supprimé le COS, rendant possible la densification des terrains (cf. Chapitre 5). Parallèlement, cette même loi a supprimé le régime de superficie minimale des terrains constructibles, afin de raffermir l'offre foncière *intramuros* à même d'éviter une extension périphérique de la ville. En revanche, elle a créé un nouveau coefficient susceptible de limiter l'artificialisation des espaces urbanisés (cf. infra).

Cependant, elle ne supprime pas dans son principe toute possibilité de transfert de capacité de construire, mais lui donne une autre configuration, et il appartient aux communes de substituer le régime du COS par d'autres règles qu'elles définissent. En supprimant le COS, la loi ALUR a également modifié les modalités de calcul du seuil minimal de densité utilisé pour le calcul du versement pour sous-densité.

Le versement pour sous-densité a été créé par la loi de finances rectificatives pour 2010 dans le but de permettre aux communes et aux établissements publics de coopération intercommunale (EPCI) de lutter contre l'étalement urbain. A ce titre, les communes et EPCI compétents en matière d'urbanisme peuvent instituer un seuil minimal de densité en deçà duquel un versement pour sous-densité est dû (C. urb., art. L. 331-36) et dont le produit leur bénéficie. Un PLU est nécessaire puisque ce seuil est déterminé par secteurs du territoire dans les zones urbaines et à urbaniser. La loi a encadré la définition du seuil par la commune pour éviter certains excès qui ne procéderaient plus d'une politique de maîtrise de la densité urbaine, et n'auraient plus qu'un objectif financier. En deçà de ce seuil, les constructeurs doivent s'acquitter d'un versement calculé à

partir de la valeur du terrain et de la surface manquante pour atteindre ledit seuil. Si ce mécanisme présente un intérêt certain pour favoriser une utilisation plus économe de l'espace, il reste facultatif, la décision de l'instituer relevant en propre des communes ou intercommunalités compétentes. Rendre son institution obligatoire pour les communes et intercommunalités constituerait un outil supplémentaire à même d'une part de faire prendre conscience de la nécessité de préserver les sols et, d'autre part, de responsabiliser les constructeurs.

• Le renforcement de la réglementation de l'occupation des sols : des objectifs chiffrés

Mobilisés par la loi "Grenelle 2" dans la perspective de la lutte contre la consommation de l'espace, les SCOT et les PLU doivent comporter, dans leurs rapports de présentation, une analyse de la consommation d'espaces naturels, agricoles et forestiers.

La loi ALUR renforce ces dispositions et le rapport de présentation du SCOT doit désormais identifier les capacités de densification et de mutation des espaces en prenant en compte la qualité des paysages et du patrimoine architectural. En outre, le rapport du PLU doit exposer les dispositions qui favorisent la densification de ces espaces ainsi que la limitation de la consommation des espaces naturels, agricoles ou forestiers, dont l'évolution doit être analysée. Dans cette perspective, le plan d'aménagement et de développement durable du PLU doit déterminer des objectifs "chiffrés" de modération de la consommation de l'espace et de lutte contre l'étalement urbain, au même titre que le document d'orientation et d'objectifs du SCOT, par référence à l'analyse de la consommation antérieure de l'espace.

8.3. Des leviers pour réduire les effets de l'artificialisation des sols

Lorsque l'artificialisation des sols n'a pas pu être évitée, par exemple pour satisfaire des besoins en logement, ou bien parce que les mécanismes juridiques à l'œuvre n'ont pas abouti à la remise en cause du projet, des leviers existent pour réduire les impacts de l'artificialisation des sols sur les sols en eux-mêmes, et sur l'environnement plus généralement.

Le premier de ces leviers réside dans la connaissance des sols et de l'environnement sur lesquels la conversion est projetée (8.3.1). Il est ensuite complété par des mesures visant à recycler le foncier artificialisé (8.3.2) et à limiter l'imperméabilisation des surfaces artificialisées (8.3.3).

8.3.1. La connaissance des sols et de l'environnement *ante* artificialisation : un enjeu pour les politiques publiques

• L'évaluation environnementale : un outil non pensé pour éviter l'artificialisation du sol

L'occupation des sols n'est pas la préoccupation principale des régimes de l'évaluation des incidences de certains projets publics et privés sur l'environnement (Directive n° 2011/92/UE), ni des incidences de certains plans et programmes sur l'environnement (Directive n° 2001/42/CE). Cette dernière directive impose néanmoins une évaluation environnementale pour les plans élaborés dans les secteurs de l'aménagement du territoire urbain et rural ou de l'affectation des sols.

La traduction en droit interne reste des plus limitée, qu'il s'agisse de l'étude d'impact ou de l'évaluation environnementale :

- L'étude d'impact décrit les facteurs susceptibles d'être affectés de manière notable par le projet, dont les terres et le sol, ainsi que les incidences notables que le projet est susceptible d'avoir sur l'environnement résultant, entre autres, de l'utilisation des ressources naturelles, en particulier les terres, le sol, l'eau et la biodiversité, en tenant compte, dans la mesure du possible, de la disponibilité durable de ces ressources (C. env., art. R. 122-5) ;
- L'évaluation environnementale des documents de planification comprend notamment l'exposé des effets notables probables de la mise en œuvre du plan, sur l'environnement, et s'il y a lieu, sur les sols, ainsi que la présentation des mesures prises pour éviter les incidences négatives sur l'environnement (C. env., art. R. 122-20).

Si le sol est bien présent, l'approche est essentiellement surfacique. Une analyse approfondie de la jurisprudence à laquelle ont pu se livrer certains auteurs met en évidence le fait qu'aucune décision ou plan n'a été annulé au motif de l'insuffisance de la prise en compte des impacts d'un projet sur la qualité du sol.

En outre, le champ d'application des mécanismes d'évaluation environnementale ne couvre pas un nombre important d'opérations qui aboutissent *in fine* à l'artificialisation du sol, telles que les ouvrages de production d'électricité à partir de l'énergie solaire inférieurs à 250 Kwc, ou la plupart des permis de construire ou d'aménager en raison des seuils élevés de surface au-delà desquels une étude d'impact est requise.

L'évaluation environnementale est un outil de connaissance, destiné à prévenir les impacts d'un plan, programme ou projet sur l'environnement. Or la connaissance du sol est souvent négligée, ce qui est préjudiciable sur le long terme, au regard du caractère non renouvelable à l'échelle humaine de cette ressource. Nul doute qu'une meilleure prise en compte de la qualité des sols permettrait de réduire considérablement les impacts de l'artificialisation sur l'environnement (cf. infra). Il ressort de cette expertise un manque important de connaissance sur l'état de référence de l'environnement et en particulier des sols, qui empêche de véritablement mesurer l'impact de l'artificialisation. L'obligation de mesurer et de conserver cet état pourrait être créée par une loi, et être calquée sur un mécanisme proche de celui de l'archéologie préventive déjà en vigueur. Il s'agirait alors d'une forme de pédologie préventive.

Enfin, l'évaluation environnementale doit comporter dans certains cas les mesures de remise en état. Elle permet ainsi de projeter sur le temps long l'état de l'environnement. En matière d'artificialisation, la généralisation d'un tel document permettrait donc de prévoir, au moment où le projet est pensé, des mesures de désartificialisation. Il s'agit là d'un levier important répondant à la question de la réversibilité, comme l'objectif d'absence de perte nette en biodiversité.

• Occupation des sols et qualité des sols : un outil à créer ?

Rares sont les décisions qui annulent le classement d'un terrain en zone constructible à raison de la qualité des sols, sauf erreur d'appréciation manifeste. Cette situation met en évidence le fait que c'est plus l'affectation souhaitée qui emporte la qualification juridique et l'usage de la zone, que la qualité du sol qui conditionne l'affectation.

Inverser la tendance, durablement, impliquerait sans doute de suivre la démarche du projet Uqualisol-ZU (Préconisation d'utilisation des sols et qualité des sols en zone urbaine et péri-urbaine – application au bassin minier de Provence) et aux préconisations qu'elle a formulées dans le cadre du programme "Gessol 3". Il s'agirait de définir des indices de qualité des sols et de les intégrer dans les documents d'urbanisme. Ces indices permettraient une mise en corrélation avec les usages possibles du sol dans le but de l'affecter le plus justement possible à telle ou telle destination en fonction de ses qualités, afin de ne pas les "gaspiller" par une artificialisation qui aurait été plus adéquate (au regard de ces indices) ailleurs. En outre, il pourrait impliquer une certaine responsabilisation des communes et intercommunalités qui devraient motiver un choix d'affectation différent de celui que pourrait suggérer l'indice sur le secteur retenu.

Cette qualification des sols via des indices synthétiques suscite un intérêt croissant. Mais il n'existe pas de consensus concernant, d'une part, la mesure de la qualité des sols, et d'autre part les paramètres les plus pertinents et incontournables pour décrire les caractéristiques et potentialités de ces sols. La réglementation en matière de contamination (calculs d'exposition et de risque sanitaire pour la population) semble cependant jouer un rôle moteur dans la caractérisation de ces sols.

8.3.2. Le recyclage du foncier

Un des principaux enjeux de réduction des impacts de l'artificialisation réside dans l'absence de conversion de parcelles agricoles ou naturelles vers un état artificialisé non réversible (imperméabilisation). En cela le recyclage du foncier est un levier central, mais dont la mise en œuvre révèle des problématiques sanitaires majeures. La reconversion de friches industrielles en habitations ou en établissements recevant du public préoccupe les autorités publiques qui tentent d'encadrer les opérations de remise en état des sites et sols pollués. Certaines pollutions dites résiduelles peuvent devenir à terme source de nuisance. En l'occurrence, l'objectif de préservation des sols peut se trouver confronté à celui de la santé humaine, et le droit public comme privé arbitrent ces reconversions.

Le droit français est en l'occurrence assez démuné en la matière et le nombre de contentieux atteste de l'incertitude dans laquelle se trouvent les autorités publiques comme les porteurs de projets. Il constitue ici un verrou à la réhabilitation et au recyclage du foncier.

La taille, la forme et la localisation des parcelles sont les principales causes de vacances des espaces. L'anticipation est ici un facteur clé et permet d'identifier les terrains susceptibles de constituer l'assise de nouveaux réseaux d'espaces de déplacement et d'espaces verts multifonctionnels. L'assemblage des espaces vacants, interstitiels ("dents creuses") nécessite des politiques incitatives permettant aux propriétaires de coopérer, en accordant des capacités de densification plus fortes dans les espaces ciblés. Le cas échéant, ces politiques seraient complémentaires des actions menées par les établissements publics fonciers à travers l'exercice de leur droit de préemption.

Aussi la littérature expose un besoin de renouvellement des outils et des moyens de financement des projets. Mais aussi des procédures de contrôle : ne pourrait-on pas établir un référentiel de qualité des sols urbanisés qui serait accompagné d'un régime de police afin de contrôler en amont les apports des polluants ?

Enfin, un suivi sur l'évaluation des pratiques de restauration devrait être systématisé et se conformer à un protocole uniformisé afin de véritablement rendre compte de l'efficacité des mesures.

8.3.3. La limitation de l'imperméabilisation des espaces artificialisés

L'imperméabilisation des sols rend très difficile voire impossible la réversibilité de l'artificialisation. En matière de biodiversité, mais aussi de gestion de l'eau, des outils existent pour limiter le recours à l'imperméabilisation sans remettre nécessairement en cause l'usage projeté.

• La protection de la « nature en ville »

Accompagnant ces aspirations, le droit offre des outils intéressants, tels que l'identification des corridors écologiques par les documents d'urbanisme ou le coefficient de biotope. Créé par la loi ALUR, le coefficient de biotope s'applique à l'échelle communale ou intercommunale : le PLU peut fixer des règles imposant "une part minimale de surfaces non imperméabilisées ou éco-aménageables, éventuellement pondérées en fonction de leur nature, afin de contribuer au maintien de la biodiversité et de la nature en ville", dénommé "coefficient de biotope" au cours des débats parlementaires. Établi sur la base d'un ratio entre la surface favorable à la nature et la surface d'une parcelle construite, ce coefficient permet de déterminer la part de la surface d'un terrain servant de station végétale ou assumant d'autres fonctions pour l'écosystème. Selon l'expérience berlinoise du coefficient de biotope par surface, la plus achevée à ce jour, ce coefficient "contribue ainsi à standardiser et à concrétiser les objectifs suivants en matière de qualité de l'environnement : garantir et améliorer le microclimat et l'hygiène atmosphérique ; garantir et développer la fonction des sols et la gestion des ressources en eau ; créer et revaloriser l'espace vital pour la faune et la flore ; améliorer l'environnement de l'habitat". Un coefficient est ainsi appliqué à chaque traitement de surface (par exemple : Surface imperméabilisée 0 ; Surface perméable non plantée 0,3 ; Surface perméable avec plantes éparses 0,5 ; Surface végétalisée sur sol naturel 1,0 ; Végétalisation des murs 0,5, etc.).

Cet outil présente également un intérêt pour tempérer les effets néfastes des îlots de chaleur urbains. Il est entendu que les sols de pelouse ou nus, comme la présence d'arbres y contribuent, bien que l'état des connaissances soit encore à approfondir.

Par ailleurs, les impacts des constructions sur la biodiversité pourraient être mieux pensés et leur prise en compte ne requerrait qu'une modification mineure du cadre juridique existant. Par exemple, en termes d'aménagement urbain, le code de la construction pourrait porter une attention accrue à la biodiversité et prévoir de favoriser l'hétérogénéité des hauteurs de bâti et des strates végétales qui sont favorables à l'abondance des oiseaux dans une ville dense.

• La gestion de l'eau et la limitation de l'imperméabilisation des sols

La refonctionnalisation des sols semble à l'ordre du jour et on note des avancées telles que celle apportée par loi biodiversité d'août 2016 qui impose la perméabilisation des parkings à construire. Dans le même ordre d'idée, la gestion de l'eau à l'échelle locale, comme à l'échelle du bassin versant, fait l'objet de mesures destinées à limiter l'imperméabilisation des sols, qu'il s'agisse de répondre à l'objectif de régulation des crues ou bien de réduire les flux de ruissellement et les polluants associés. Ainsi, la loi sur l'eau du 3 janvier 1992 a institué l'article L. 2224-10 du Code général des collectivités territoriales, qui demande au maire de délimiter les zones d'assainissement collectif et non collectif, mais aussi « les zones où des mesures doivent être prises pour limiter l'imperméabilisation des sols et pour assurer la maîtrise du débit et de l'écoulement des eaux pluviales et de ruissellement ». Cette disposition instaure un véritable « zonage pluvial », renforcé par la loi du 30 décembre 2006, qui a instauré une obligation générale « de collecte ou de traitement à la charge des collectivités territoriales ».

Les mesures entreprises se traduisent notamment par la réalisation d'aménagements de surfaces perméables, c'est-à-dire en gravier, gazon ou pavés autobloquants, etc., devant être accompagnés de travaux destinés à augmenter la capacité d'absorption du sol (pour atteindre un résultat d'environ 1 cm/s).

Encadré 8-7 - La taxe pour la gestion des eaux pluviales : un outil de limitation de l'imperméabilisation des sols

La loi Grenelle II ouvre aux communes assurant la collecte des eaux pluviales la possibilité d'instituer une taxe annuelle de gestion des eaux pluviales. Ce mécanisme est facultatif, mais mérite d'être mentionné en raison des abattements qu'il prévoit :

Ils sont prévus en contrepartie de la mise en place de dispositifs limitant le rejet d'eaux pluviales hors du terrain. Ces dispositifs ne dépendent pas uniquement du taux d'imperméabilisation de la parcelle. Ils consistent principalement en la mise en place de gouttières et de systèmes d'évacuation de l'eau.

Cependant, cette taxe est assise sur la superficie cadastrale des terrains et selon la loi, lorsque le terrain assujéti à la taxe comporte une partie non imperméabilisée, la superficie de cette partie est déduite de l'assiette de la taxe. Partant, le droit reconnaît le rôle des sols dans l'absorption des eaux pluviales et leur contribution à diminuer le risque d'inondation. Sur ce dernier point, l'assise de la taxe pourrait inciter les propriétaires à limiter l'imperméabilisation de leur parcelle.

8.4. Des leviers pour compenser les effets de l'artificialisation des sols

Actuellement en France, il n'existe pas de mécanismes de compensation spécifiquement destinés à compenser l'artificialisation des sols et/ou ses impacts les plus importants (sur la biodiversité, mais aussi sur l'hydrologie, la pollution des sols ou le climat urbain). Cependant, on peut en recenser trois susceptibles de s'appliquer : la compensation telle qu'elle est prévue par les études d'impacts, celle prévue par le code forestier et enfin, le mécanisme de compensation collective agricole.

• La compensation prévue par les études d'impact

Les textes précédemment envisagés évoquent la compensation des atteintes à l'environnement en général, au sol en particulier. La compensation constitue une "mesure balai" qui n'intervient qu'au terme d'une séquence hiérarchisée, lorsqu'il n'a pas été possible d'éviter ou de réduire l'artificialisation. La question est rarement abordée en droit de l'urbanisme, voire même pas du tout, alors qu'elle est plus courante pour les ouvrages et aménagements, à l'instar des projets d'infrastructures de transport. La compensation s'attache *a priori* à la naturalité du sol, puisqu'il s'agit "de compenser, dans le respect de leur équivalence écologique, les atteintes prévues ou prévisibles à la biodiversité occasionnées par la réalisation d'un projet de travaux ou d'ouvrage ou par la réalisation d'activités ou l'exécution d'un plan, d'un schéma, d'un programme ou d'un autre document de planification".

L'appréciation du caractère suffisant de la réponse apportée est cependant de nature spéculative, qui anticipe les résultats de la mise en œuvre des mesures. Un correctif a été trouvé avec l'obligation pour le maître d'ouvrage d'assurer le suivi de la réalisation de ces mesures ainsi que celui de leurs effets sur l'environnement. Le code de l'environnement prévoit que des bilans réguliers soient transmis à l'autorité compétente, qui peut arrêter des correctifs et garantir d'une façon générale la bonne exécution de ces mesures (mise en demeure et exécution d'office en cas de carence, sanctions pénales, garanties financières). En l'occurrence, s'agissant d'artificialisation des sols, la mesure pourra consister, par exemple, en la réhabilitation d'un sol artificialisé en lui faisant recouvrir ses fonctionnalités naturelles, ou la préservation de milieux permettant de compenser les services écosystémiques affectés par cette artificialisation.

• La compensation forestière : le développement d'un mécanisme de compensation économique

Le code forestier subordonne les opérations de défrichement des bois à la condition que soit exécutée, sur d'autres terrains, de travaux de boisement ou reboisement pour une surface correspondant à la surface défrichée, assortie, le cas échéant, d'un coefficient multiplicateur compris entre 1 et 5, déterminé en fonction du rôle économique, écologique et social des bois et forêts objets du défrichement, ou d'autres travaux d'amélioration sylvicoles d'un montant équivalent.

Ce mécanisme préserve ainsi la disponibilité forestière en prenant en compte les caractéristiques du bois défriché. Cela étant dit, de récentes modifications (2014) ont abouti à la création d'un fonds stratégique de la forêt et du bois, qui permet au pétitionnaire de s'acquitter de son obligation en y versant un montant équivalent.

• La compensation collective agricole

La loi d'avenir pour l'agriculture, l'alimentation et la forêt (2014) impose la réalisation d'une étude préalable pour le maître d'ouvrage d'un projet de travaux, d'ouvrages ou d'aménagements publics ou privés susceptible d'avoir des conséquences négatives importantes sur l'économie agricole. Cette étude relève de la « *compensation collective agricole* ».

Ce mécanisme est intéressant du point de vue de l'artificialisation, mais son champ d'application s'avère limité. Le Code rural prévoit en effet trois critères cumulatifs pour que les projets soient soumis à cette obligation de compensation :

1. Les projets doivent être soumis à une étude d'impact « systématique » et non « au cas par cas », c'est-à-dire ne dépendant pas de conditions de surface ou de volume.
2. Ces projets doivent en outre avoir une emprise située sur des parcelles affectées ou ayant été affectées à une activité agricole conformément à l'article L. 311-1 du Code rural et de la pêche maritime, dans les 5 ou 3 dernières années en fonction de leur localisation dans les documents d'urbanisme.
3. Les projets doivent impliquer le prélèvement d'une surface, de manière définitive, en principe supérieure à 5 hectares.

Cet outil est encore trop récent pour réellement apprécier les effets de sa mise en œuvre. Par ailleurs, il est important de noter que les mesures compensatoires ne s'expriment pas nécessairement en termes fonciers.

• La compensation de l'artificialisation : quelles perspectives ?

L'Allemagne est régulièrement citée en exemple en tant que pays ayant mis en place un mécanisme de compensation de l'artificialisation des sols. C'est en réalité l'urbanisation qui est compensée depuis la fin des années 1990 grâce à un marché d'écopoints mis en œuvre à l'échelle des *Länder* et gérés par des agences. Par ailleurs, l'exemple de la ville de Dresden mérite

d'être cité : des mesures de « désimperméabilisation des sols » en guise de compensation sont explicitement prévues et entre 2000 et 2008, on comptait 4 ha désimperméabilisés par an en moyenne.

La compensation financière est également à l'étude et on peut citer l'exemple de la Tchéquie et de la Slovaquie qui ont créé une nomenclature des terres agricoles en fonction de leur fertilité. Lorsqu'un projet prévoit la conversion d'une bonne terre, le porteur de projet doit demander un permis spécial délivré soit par la Région soit par le Ministère de l'environnement et s'acquitter d'une somme correspondant au prix du m² multiplié par la surface artificialisée. Cependant, ce mécanisme est jugé très permissif vu les tarifs, surtout en zone de forte pression foncière.

En France, on pourrait citer l'exemple du transfert des droits à bâtir (Chapitre 5). Pour mémoire, Le transfert de droit à bâtir est un outil économique susceptible d'influer sur les caractéristiques des marchés fonciers et immobiliers. Il permet au porteur de projet d'augmenter la densité sur une parcelle en achetant des droits non utilisés sur une autre parcelle de la même zone. Pour l'heure, le recours à cet outil est négligeable : l'absence d'un marché suffisant pour fixer des prix cohérents, les contraintes législatives et le régime d'autorisation préalable mis en place expliquent en partie ce constat. Il pourrait peut-être se développer sous l'impulsion de la loi ALUR (2014) qui a créé un mécanisme de transfert de constructibilité dans les zones à protéger en raison de leurs paysages.

8.5. Conclusion

Eviter, réduire ou compenser l'artificialisation des sols, et en particulier ses formes les plus impactantes et les moins réversibles comme l'imperméabilisation, sont trois objectifs dont la satisfaction nécessite la mise en œuvre croisée d'outils juridiques et fiscaux variés et qui n'ont pas nécessairement été pensés à ces fins.

Trois éléments se détachent de l'étude du droit français :

- Des controverses juridiques s'exercent au sujet de la notion d'artificialisation, qui n'est pas définie par le droit et qui est une notion qu'on ne retrouve pas dans les textes européens ou internationaux.
- En découle une absence de politique générale de lutte contre l'artificialisation. Les pouvoirs publics, à l'échelle nationale ont une approche partielle en se concentrant par exemple sur la lutte contre le morcellement des terres agricoles. L'efficacité des mesures est alors réduite, d'autant que leur mise en œuvre est rarement contraignante.
- De manière plus générale, l'absence de régulation spécifique de l'artificialisation des sols s'inscrit dans un contexte français où les sols ne sont pas directement inscrits dans un cadre de protection.

La littérature juridique à propos de l'artificialisation des sols est assez pauvre quantitativement, et il est rare qu'un article soit consacré exclusivement à cette question, sauf lorsque le texte ou la décision juridictionnelle la concerne (comme les dispositions particulières de la loi ALUR). L'artificialisation, sous cette dénomination ou sous des termes qui l'évoquent (étalement urbain...), est plus souvent traitée par incidence, au détour d'une disposition.

Une définition de l'artificialisation, ou de critères permettant de la caractériser, permettrait de mieux l'appréhender juridiquement, même si son absence ne s'oppose pas à la mobilisation d'instruments juridiques pour la limiter ou l'éviter.

La définition d'une politique nationale en faveur de la protection des sols contre leur artificialisation et l'affirmation de principes généraux permettraient d'une part de faire du sol une "cause nationale" (la protection des sols contre leur artificialisation est un objectif d'intérêt général), d'autre part, de sensibiliser à leur protection et, enfin et surtout, de fonder l'adoption de dispositions juridiques à même de satisfaire cet objectif.

La fiscalité n'est pas neutre pour l'artificialisation des sols. L'essentiel des discussions actuelles, notamment en France, tend à y voir un levier d'action de premier rang dans la lutte contre l'insuffisance de logements en France. Par la conquête notamment d'espaces non construits en zones urbaines, les orientations à venir pourraient tout à fait servir l'objectif d'une moindre artificialisation des sols. Il est toutefois évident que toute réforme fiscale basée sur la modulation des taux et/ou la création de nouvelles taxes ne prendra sa pleine mesure qu'accompagnée d'une politique de régulation foncière convergente donc fermement adossée aux outils de planification. À ce titre, la question de l'échelle de collectivité à qui confier cette politique se pose. Parce que les enjeux et territoires dépassent bien souvent le cadre strict des communes, la montée en puissance des intercommunalités sur ce sujet mériterait d'être confortée.

En dépit des impulsions politiques en faveur de la transition écologique (2013), rares sont les travaux qui ont été consacrés aux instruments financiers et fiscaux incitant à la densification, non pas tant en raison de la technicité de l'exercice que de l'absence de spécialistes de ces questions. L'essentiel de la question a été abordé dans le cadre du Comité français pour la fiscalité écologique (devenu Comité pour l'économie verte). D'autres suggestions qui mériteraient d'être explorées ont été formulées par ce Comité, à l'instar d'une taxation des bureaux vacants sur le modèle de la fiscalité des logements vacants, permettant d'inciter à les mettre sur le marché plutôt que d'en construire d'autres. Ou d'une taxation des friches industrielles et commerciales pour inciter au recyclage foncier.

A quelques exceptions près, la fiscalité actuelle n'a pas été pensée en termes d'incitations à limiter la "consommation" des sols, mais en vue du financement des équipements ou d'autres politiques. Elle n'a donc, par nature, qu'un effet incitatif indirect sur la réduction de l'imperméabilisation, lorsqu'elle n'est pas neutre à cet égard ou n'a pas un effet négatif incitant à la consommation foncière. Si la fiscalité liée au foncier est envisageable pour limiter l'étalement urbain et l'artificialisation des sols, il convient de respecter quelques lignes directrices :

- La "libération" du foncier en vue de favoriser la densification et éviter l'étalement urbain ne doit pas interdire de construire dans certains secteurs "adéquats" ;
- Le revenu de la fiscalité instituée afin de limiter l'utilisation des sols ne doit pas bénéficier à la personne publique qui l'institue, son objet étant la dissuasion et non la production de gains ;
- Le taux de fiscalité doit être incitatif ;
- Le principe constitutionnel de l'autonomie financière des collectivités territoriales (leurs ressources propres doivent constituer une part déterminante de l'ensemble de leurs ressources) doit être respecté.

Auteurs et éditeurs de l'expertise

Experts auteurs du rapport d'expertise

Béatrice Béchet (pilote scientifique), IFSTTAR, IRSTV
Yves Le Bissonnais (pilote scientifique), INRA, LISAH
Anne Ruas (pilote scientifique), IFSTTAR, COSYS – LISIS
 Anne Aguilera (**coord.**), IFSTTAR, LVMT
 Michel André, IFSTTAR, AME LTE
 Hervé Andrieu (**coord.**), IFSTTAR – IRSTV
 Jean-Sauveur Ay, INRA, CESAER
 Catherine Baumont, Univ. Bourgogne Franche-Comté, LEDI
 Eric Barbe (**coord.**), IRSTEA, TETIS
 Laure Beaudet-Vidal, AgroCampus Ouest, EPHOR
 Leslie Belton-Chevallier, IFSTTAR, LVMT
 Emmanuel Berthier, Cerema
 Philippe Billet, Univ. Lyon 3, CNRS - UMR 5600 - EVS-IDE
 Olivier Bonin, IFSTTAR, LVMT
 Jean Cavailhès (**coord.**), INRA, CESAER
 Katia Chancibault, IFSTTAR IRSTV
 Marianne Cohen (**coord.**), Univ. Paris I, UMR ENeC
 Thomas Coisson, Univ. d'Angers, EGS
 Robert Colas, Univ. Paris VII, LADYSS
 Sophie Cornu (**coord.**), Inra, GSE
 Jérôme Cortet, CNRS CEFE, Univ. de Montpellier 3
 Laetitia Dablanç (**coord.**), IFSTTAR, SPLOTT
 Ségolène Darly, Univ. Paris VIII, Ladyss
 Cécile Delolme (**coord.**), Univ. Paris est, UMR Ecol Hydrosyst Nat & Anthropises
 Valérie Facchinetti-Mannone, Théma, UMR 6049 CNRS, Université Bourgogne Franche-Comté
 Gabrielle Fack, Univ. Paris I, CES
 Nathalie Fromin, Univ. de Montp. 3, CNRS CEFE
 Sébastien Gadal, Univ. Aix-Marseille, UMR Espace
 Benoît Gauvreau, IFSTTAR AME LAE
 Ghislain Géniaux (**coord.**), INRA, SAD
 Frédéric Gilli, Sc. Po. Paris
 Sonia Guelton, Univ. Paris Est, Lab'Urba

Equipe projet

Fanny Boursault, INRA, Depe : logistique
 Natacha Bufquin, IFSTTAR : documentation
 Maylis Desrousseaux (**coord.**), INRA, Depe : conduite du projet, rédaction et coordination éditoriale (Démarrage du projet par Pauline Marty)

Supervision

Antoine Frémont, IFSTTAR, Directeur scientifique adjoint

Marianne Guérois, CNRS, Géographie-Cités
 Mickaël Hedde (**coord.**), INRA, Unité ECOSYS
 Thomas Houet, CNRS, LETG
 Sylvain Humbertclaude (expert technique), INSEE
 Laurence Jolivet, IGN, COGIT
 Catherine Keller, Univ. Aix Marseille, CEREGE
 Iwan Le Berre, LETG, Brest Géomer, IUEM-Ubo
 Pierre Madec (expert technique), Sc. Po. Paris, OFCE
 Clément Mallet, IGN, Matis
 Pauline Marty, UTT de Troyes
 Catherine Mering (**coord.**), Université Paris VII, PRODIG
 Marjorie Musy (**coord.**), Ecole d'Architecture de Nantes, CRENAU
 Walid Oueslati, Univ. d'Angers
 Sonia Paty, Univ. Lyon Saint Etienne, GATE
 Mario Polèse (**coord.**), INRS, Centre urbanisation culture société, Canada
 Denise Pumain, CNRS, Géographie-Cités
 Anne Puissant, Université de Strasbourg, Lab. Image, ville, environnement
 Stéphane Riou, Univ. Lyon Saint Etienne, GATE
 Fabrice Rodriguez, IFSTTAR - GERS - EE
 Véronique Ruban, IFSTTAR – IRSTV
 Julien Salanié, Univ. Saint Etienne, Gate
 Christophe Schwartz, Univ. de Lorraine, LES
 Aurélie Sotura, Ecole d'économie de Paris
 Mariane Thébert, IFSTTAR, LVMT
 Thomas Thévenin, Théma, UMR 6049 CNRS, Univ. Bourgogne Franche-Comté
 Jacques Thisse, Professeur émérite à l'Univ. catholique de Louvain, Belgique
 Alan Vergnès, CNRS CEFE, Univ. de Montpellier 3
 Christiane Weber (**coord.**), CNRS, TETIS
 Caty Wery, IRSTEA, GESTE

Kim Girard, INRA, Depe : logistique
 Sophie Le Perchec, INRA : documentation
 Isabelle Savini, INRA, Depe : suivi du projet, rédaction et coordination éditoriale

Bertrand Schmitt, INRA, Directeur de la DEPE



Photographie de couverture : Christian Slagmulder - Inra



INRA

SCIENCE & IMPACT

Délégation à l'Expertise Scientifique, à la Prospective et aux Etudes

147, rue de l'Université
75338 Paris Cedex 07
France

Tél. : + 33 1 42 75 94 90
Fax : + 33 1 42 75 91 72
www.inra.fr

