



École des Ponts

ParisTech

Artificialisation des sols

Rapport final



Araujo-Oliveira Isadora
Bachelet Brunilde
Garcia Andres
Ishii Riho
Munoz Julien
Wallart Emile

Tuteur : Babut Rémi, The Shift Project

Qu'est-ce que l'artificialisation ?	2
Définitions	2
Les enjeux et impacts liés au phénomène d'artificialisation des sols	3
Etat de l'art : Quelques méthodes de calcul et leurs résultats	4
Méthodologie de calcul	6
Logique de calcul	6
Principales mesures possibles et envisagées pour lutter contre l'artificialisation des sols	9
Résultats	11
Principaux résultats : effets différenciés des mesures	11
Principaux résultats : effets combinés des mesures	14
Discussion	14
Analyse des mesures	14
Scénarios	16
Recommandations	18
Bibliographie	20
Annexes	22
Annexe 1 : Autres méthodes de mesure et d'analyse de l'artificialisation des sols	22
Annexe 2 : Correspondance entre les zonage Otel, Insee, et les catégories utilisées dans notre modèle	23
Annexe 3 : Résultats du test du levier "renouvellement"	24
Annexe 4 : Résultats du test du levier "renaturation"	24
Annexe 5 : Résumé des effets des leviers testés indépendamment	24

I. Qu'est-ce que l'artificialisation ?

1) Définitions

Tout d'abord, il convient de fixer la définition de plusieurs termes : artificialisation, imperméabilisation, renouvellement urbain, densification et renaturation pour comprendre le sujet en profondeur.

La notion d'**artificialisation** fait l'objet de plusieurs définitions différentes qui impactent le calcul de la surface artificialisée. Ainsi, le Ministère de la Transition Écologique, au travers récemment de l'Observatoire de l'Artificialisation [1], définit l'artificialisation comme le « **changement d'état effectif d'une surface agricole, forestière ou naturelle vers des surfaces artificialisées** ». Sont donc considérées comme artificialisées les surfaces suivantes : les tissus urbains, les zones industrielles et commerciales, les infrastructures de transport et leurs dépendances, les mines et carrières à ciel ouvert, les décharges et chantiers, les espaces verts urbains (espaces végétalisés inclus dans le tissu urbain) et les équipements sportifs et de loisirs y compris des golfs. Cette définition considère donc les espaces verts urbains comme artificialisés.

L'Insee [2] adopte une définition similaire en désignant par artificialisation le "phénomène anthropique par lequel des espaces naturels, agricoles et forestiers sont transformés au profit d'implantations artificielles" ; l'institut ne prend cependant pas en compte dans ses calculs les espaces verts, ni les voiries.

Pour notre travail, **nous adoptons la vision de l'Observatoire de l'Artificialisation : nous considérons comme artificialisée toute surface qui n'est pas naturelle, agricole ou forestière.**

L'**imperméabilisation** est une notion importante liée à l'artificialisation ; d'après l'IDDRI [3], on parle d'imperméabilisation des sols lorsque « l'eau ne peut plus s'y infiltrer, c'est-à-dire quand le sol est bâti ou revêtu. L'imperméabilisation ne concerne donc qu'une partie des espaces artificialisés ». La méthode Teruti-Lucas par exemple, qui se base sur la définition du gouvernement que nous avons retenue pour les sols artificialisés, considère que ces derniers correspondent aux espaces imperméabilisés ainsi qu'aux espaces verts et jardins.

Afin d'atteindre l'objectif de "zéro artificialisation nette" fixé par le gouvernement, plusieurs leviers techniques existent [4] :

- le **renouvellement urbain**, qui consiste à construire en recyclant des ressources bâties ou du foncier déjà artificialisé (sur des friches par exemple).
- la **densification du bâti**, qui consiste à maximiser le rapport entre la surface de plancher construite et la surface de la parcelle (en construisant sur plusieurs étages par exemple).
- la **désartificialisation** : l'objectif fixé par le gouvernement concerne l'artificialisation nette, donc il s'agit de "compenser" les surfaces nouvellement artificialisées par la désartificialisation de surfaces équivalentes. Cette notion s'assimile à celle de **renaturation**, ie. l'ensemble des processus qui permettent de ramener un sol dénaturé à un état proche de son état initial.

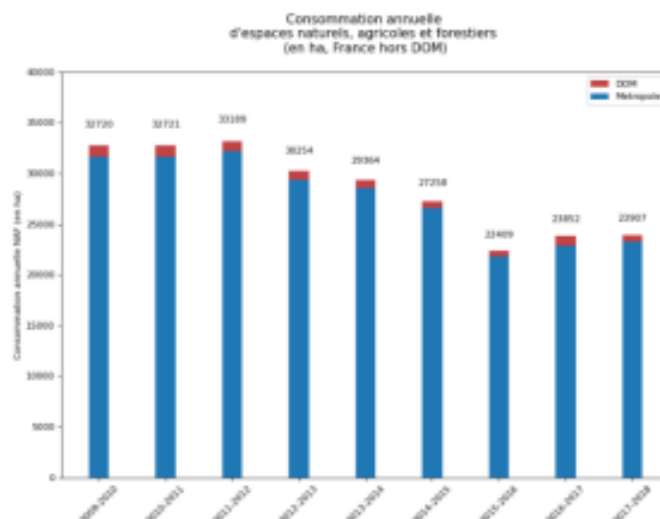
L'utilisation optimale de ces leviers sur l'ensemble du territoire est possible via une planification territoriale organisée et une évolution des législations encadrant l'aménagement.

2) Les enjeux et impacts liés au phénomène d'artificialisation des sols

La dernière décennie en France a été le théâtre d'une prise de conscience massive sur le phénomène d'artificialisation des sols. Selon la définition considérée de l'artificialisation du sol et selon la méthode de calcul retenue, les chiffres oscillent **entre 5,6 et 9,3% [5] du territoire artificialisé en 2016** ; le CGDD s'accorde sur le chiffre de 6,7% du territoire imperméabilisé en 2018 [6].

Par comparaison, la surface artificialisée en France en 2012 (5,2%) est supérieure à la moyenne européenne à la même date (4,1%) ; la France est par ailleurs plus artificialisée que ses voisins en termes de surface : 30.000 km² contre 26.000 en Allemagne par exemple [5].

Autre indicateur de l'ampleur du phénomène, **le rythme d'artificialisation des sols varie entre +15.000 hectares par an** (données Corine Land Cover [2]) **et +86.000 hectares par an** (données Teruti-Lucas [7]). **Ce rythme s'est d'ailleurs accéléré** selon Agreste et Teruti-Lucas : d'une augmentation de 61.000 hectares par an entre 1992 et 2003, on atteint une augmentation de 86.000 ha/an entre 2006 et 2009.



Source : Observatoire de l'artificialisation [8]

Ainsi, la France est déjà fortement artificialisée par comparaison à d'autres pays européens et continue de s'artificialiser à un rythme effréné. Parmi les causes principales, l'Insee [2] pointe du doigt la construction de logements individuels essentiellement qui représente plus de la moitié des nouvelles artificialisations. C'est donc le phénomène d'**étalement urbain** qui explique en majorité le rythme d'artificialisation observé : en France, la consommation de sols pour bâtir la ville a accéléré depuis les années 60 à un rythme jusqu'à trois fois supérieur à l'accroissement de la population [9]. Ce phénomène est exacerbé par les spécificités françaises comme le nombre de résidences secondaires dans le pays et l'augmentation du nombre de logements vacants, selon Julien Fosse (rédacteur du rapport France Stratégie [10], propos tenus lors d'un entretien avec notre groupe).

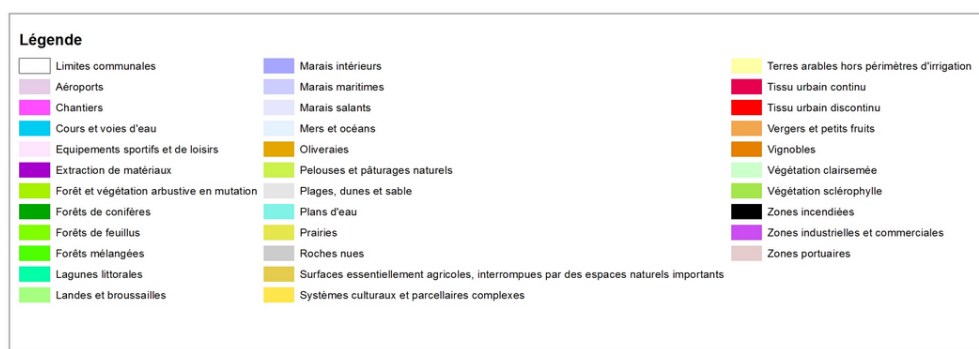
Ce constat sur l'artificialisation des sols, bien que récent, pose d'ores et déjà de nombreuses questions sur les impacts divers du phénomène. En effet, l'artificialisation étant déjà avancée en France, limiter ses effets et donc ralentir le rythme est un enjeu majeur pour plusieurs raisons.

L'Insee recense ainsi **plusieurs impacts néfastes pour l'environnement**, parmi lesquels : l'imperméabilisation des sols, qui augmente le risque d'érosion, de coulées de boues et d'inondation ; la menace sur la biodiversité, via la fragmentation des écosystèmes ; la diminution de la capacité de production agricole avec le grignotement progressif de ces terres ; l'éventuel déstockage de carbone contenu dans les sols, ou à minima la perte de capacité de captage de CO₂ ; et enfin l'augmentation indirecte des émissions via l'étalement urbain et l'allongement des distances domicile-travail. Le gouvernement français [11] reprend ces impacts et y ajoute l'augmentation des dépenses liées à l'entretien des voiries d'accès et réseaux, dont la présence accroît par ailleurs la fragmentation des écosystèmes, la fracture socio-territoriale, la pollution environnementale et sonore.

L'impact direct de l'artificialisation des sols sur l'environnement fait de la lutte contre ce phénomène un enjeu majeur des décennies à venir. Ainsi, le gouvernement a adopté le Plan Biodiversité le 4 juillet 2018, qui fixe un **objectif de "zéro artificialisation nette"** [6]. Cet objectif est aujourd'hui visé pour 2050, en cohérence avec les échéances internationales. Une enquête France Stratégie montre cependant que l'objectif serait atteignable en 2030 [10].

3) Etat de l'art : Quelques méthodes de calcul et leurs résultats

En France et en Europe, plusieurs organismes ont pour objectif **de mesurer l'évolution de l'artificialisation des sols**. Chacun utilise des méthodologies différentes, adaptées à leurs buts précis. Ils parviennent donc à des résultats divergents. Nous avons utilisé la base de données Corine Land Cover. Initiative lancée en 1985 par la commission européenne, c'est un inventaire biophysique de l'occupation des sols et de son évolution qui repose sur une interprétation visuelle d'images satellitaires. Les résultats sont donnés selon une nomenclature très détaillée pour décrire les surfaces observées. La finesse de l'analyse est contrainte par la taille de l'unité de collecte de 25 ha, qui ne lui permet pas d'être utilisée pour des études locales à trop petite échelle. Nous avons choisi d'utiliser cette base de données pour plusieurs raisons: elle traite par imagerie satellite 100% des surfaces du sol métropolitain, contrairement aux données se basant sur le cadastre, donc elle nous permettra d'être quantitativement plus précise. De plus, elle nous permet d'obtenir pour chaque commune française un stock des surfaces artificialisées de différents types et non artificialisées, et également le rythme d'artificialisation.



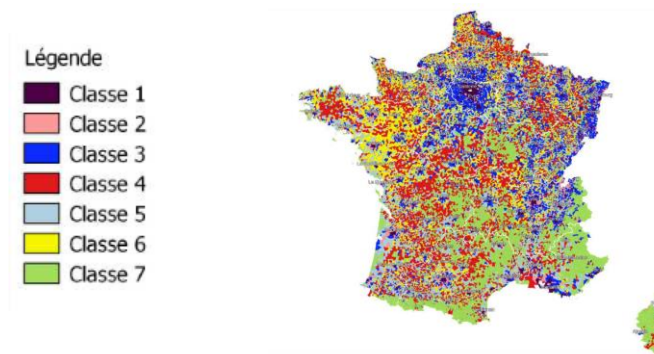
Nomenclature (Corine Land Cover)

Pour interpréter ces données, nous nous sommes inspirés de deux rapports du CGDD [4] et de France Stratégie [10] qui décomposent la quantité des nouvelles surfaces artificialisées comme un produit de facteurs :

$$A = \frac{S \cdot (1 - R)}{D} - N$$

où A est la somme des surfaces de sols artificialisées, S la somme des surfaces de plancher à bâtir, R le taux de construction par renouvellement urbain, D la densité du bâti et N la somme des surfaces renaturées. France Stratégie et le CGDD utilisent cette formule, le premier par prolongement des tendances de la construction et le second à partir de projections démographiques de l'Insee [20], pour prévoir les chiffres de l'artificialisation des sols en France jusqu'en 2050, et tester plusieurs scénarios dépendant de l'action publique.

A ces études sur l'artificialisation des sols, il faut ajouter des **études prospectives sur la demande de l'habitat** qui sont cruciales pour prédire les tendances de l'artificialisation. En France, le CEREMA a développé un modèle appelé Otelo qui sépare les villes françaises selon 7 catégories en fonction de dizaines de variables et prédit la demande en nouveaux logements pour les prochaines décennies.



Découpage du territoire français par le CEREMA

II. Méthodologie de calcul

1) Logique de calcul

Notre modèle a été développé dans le logiciel "Excel". De manière simplifiée, nous avons choisi 7 paramètres ajustables par l'utilisateur qui vont modifier les résultats, dont quatre paramètres qui induisent un changement de comportement individuel :

- Proportion de logements collectifs/individuels ;
- Taille des logements ;
- Nombre d'étages ;
- Taux de renouvellement ;
- Taux de vacance des logements ;
- Taux de vacance des surfaces commerciales ;
- Renaturation.

Ensuite, à travers les calculs qui seront plus détaillés ensuite, le modèle détermine l'artificialisation mesurée selon plusieurs indicateurs :

- Le flux d'artificialisation total et par catégorie de chaque décennie de 2010 à 2050 ;
- Surface artificialisée totale et par catégorie à chaque 10 ans de 2020 à 2050 ;
- Réduction de surface et du flux d'artificialisation en 2050 par rapport le business as usual ;
- Réponse à l'atteinte de l'objectif de ZAN.

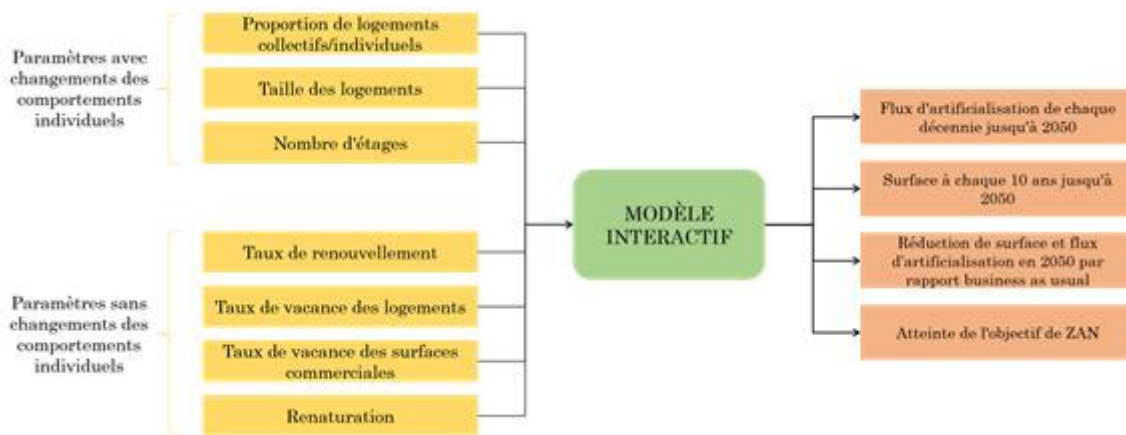


Schéma du modèle

Notre modèle repose sur plusieurs hypothèses. La première qu'il est important d'explicitier est la correspondance entre certaines bases de données. Nous avons réalisé un travail important pour adapter ces données, notamment pour calculer les tendances moyennes d'artificialisation pour chaque classe de commune Otelo. Comme toutes les bases de données nécessaires aux calculs n'ont pas considéré la même classification urbaine, nous avons dû établir des correspondances notamment entre les zones Otelo et d'autres catégorisations. Elles sont présentées en annexe 2.

De manière simplifiée, le modèle de calcul a été construit en trois parties, en considérant les contributions de l'artificialisation du logement individuel, du logement collectif et de tout ce qui ne concerne pas le logement, comme les surfaces commerciales. Le modèle vise à utiliser les tendances passées pour faire des prévisions, et la base de données initiale utilisée comme référence pour les prévisions date de 2018. Ce fait indique que, même si on est déjà en 2021, les résultats présentés en 2020 sont prédictifs. Le modèle indique l'artificialisation des sols projetée pour chaque intervalle de 10 ans, de 2020 à 2050, qui a été choisi comme limite temporelle afin de mener une analyse comparative avec l'objectif de la ZAN dans cette même année.

Un autre hypothèse importante, qui peut être considérée comme une limite du modèle, est le fait que tous les changements soient appliqués dès les premières prédictions de manière "brutale" pour avoir l'effet des leviers sur les flux ; ce n'est donc pas un changement progressif des flux dans le temps. Par exemple, concernant le paramètre "proportion logement collectif/individuel", si l'on choisit un facteur de diminution de 2, cela réduira la proportion d'origine par 2 dès 2020. Les paramètres ne seront pas réduits par exemple de 5% par an.

Pour construire le modèle, nous avons gardé constantes les proportions logements / commerces / autres au cours du temps pour pallier au manque de données nécessaires. Nous avons donc considéré que pour un logement créé, une surface supplémentaire est artificialisée pour les infrastructures et les activités et que cette surface est proportionnelle à celle artificialisée pour le logement. Un autre point important à préciser est le fait que la consommation de surface de la partie logement est beaucoup plus importante et c'est pourquoi les leviers qu'on considère dans le modèle interfèrent surtout dans la partie artificialisation due au logement, car cela permet de voir de plus grands changements dans les résultats selon l'ajustement des paramètres.

Parmi l'ensemble des bases de données utilisées pour les calculs du modèle, une partie est constituée des résultats du modèle du groupe chargé de l'étude des nouveaux logements, qui a permis de prédire le nombre annuel moyen de besoins en nouveaux logements (répartis entre individuels et collectifs) pour chaque intervalle de 10 ans entre les années 2010 et 2050. Grâce à la proportion moyenne de surface consommée par les logements, donnée trouvée dans le rapport de l'Insee [2], il a été possible de calculer la contribution de la surface artificialisée pour chacun de ces deux types de logements pour chaque zone Otelo et d'utiliser cette tendance pour calculer la prévision de surface et de flux

d'artificialisation dans les intervalles de 10 ans suivants. Ce calcul concerne le modèle "business as usual" qui sera utilisé comme référence pour la comparaison de l'efficacité des paramètres ajustés.

En ce qui concerne les paramètres ajustables, à l'exception de la "renaturation", il est possible de les modifier séparément pour les zones très denses, les zones denses ou les zones rurales. Enfin, voici quelques détails concernant chaque paramètre ajustable :

- Proportion de logements collectifs/individuels

Pour ajuster le modèle en fonction de ce paramètre, le taux de logement individuel est divisé par le facteur choisi.

- Taille des logements

On multiplie la surface artificialisée des logements par (1-facteur de réduction de la taille des logements). Cependant, une hypothèse d'approximation importante dans la construction du modèle est que la part d'artificialisation due au logement est toujours constante, c'est-à-dire que si l'on réduit la proportion de logement, on réduit nécessairement l'artificialisation due au logement dans la même proportion et par conséquent l'artificialisation totale. Cette approximation interfère dans ce paramètre car si on réduit la taille du logement, l'artificialisation totale sera également réduite dans la même proportion.

- Nombre d'étages

Pour ce paramètre, les données relatives au nombre d'immeubles étaient nécessaires. Pour ce faire, le nombre de logements collectifs a été divisé par le "nombre de logements par étage", puis par le "nombre d'étages par immeuble". Ces deux dernières données sont une valeur moyenne constante pour toutes les zones Otelo. Ensuite, en fonction du nombre d'étages supplémentaires ajusté dans le paramètre, le calcul du nouveau nombre d'immeubles a été effectué. En effet, si l'on a plus d'étages par immeuble, on considère qu'on aura besoin de moins d'immeubles.

- Taux de renouvellement

Le taux de renouvellement initial est une moyenne nationale, auquel on ajoute des points de pourcentage. Cette augmentation du taux de renouvellement permet la diminution du nombre de constructions en artificialisation.

- Taux de vacance des logements

Pour un taux de vacance T, le besoin réel en logement sera le nombre de logements multiplié par (1-T). On multiplie donc le besoin en logement par (1-T) et on divise par (1-T/facteur réduction). Les taux annuels moyens de logements vacants prévus ont été donnés par le groupe de logements neufs et varient selon la zone Otelo et pour chaque année étudiée.

- Taux de vacance des surfaces commerciales

Les surfaces artificialisées étant déjà prises en compte dans le calcul, on calcule l'effet des paramètres agissant sur le commerce comme une différence. Plus précisément, on multiplie la surface totale dans le scénario de référence par la proportion de surface dédiée au commerce et par (1-taux de vacance), ce à quoi on soustrait la surface totale dans le scénario de référence multipliée par la proportion dédiée au commerce multipliée par (1-nouveau taux de vacance). Sont utilisés comme hypothèses pour ce calcul le pourcentage de la surface consommée par commerce et le pourcentage de vacance des surfaces commerciales comme valeur constante pour toutes les zones Otelo. Un autre paramètre ajustable est la mesure concernant l'interdiction de construire des zones commerciales de plus de 10 000 m². Pour cela, nous soustrayons simplement la surface que l'on attribue aux opérations commerciales de plus de 10 000 m² et nous la divisons par 7 (nombre de zones).

- Renaturation

Nous considérons deux paramètres : le pourcentage des surfaces commerciales vacantes renaturées annuellement d'une part, et la renaturation des friches industrielles d'autre part, qui est une valeur moyenne nationale. Nous retirons de la surface artificialisée totale un pourcentage annuel de la surface totale des friches (somme des termes d'une suite géométrique de raison qui correspond au pourcentage des friches renouvelé). Pour des raisons de convention et de calcul, la surface d'artificialisation de la renaturation est négative.

2) Principales mesures possibles et envisagées pour lutter contre l'artificialisation des sols

L'étude de l'état de l'art montre que 3 leviers sont exploitables pour diminuer l'artificialisation des sols : la densification, le renouvellement urbain et la renaturation des sols. Des mesures, prises par le gouvernement ou d'autres acteurs (aménageurs, citoyens), peuvent contribuer à optimiser l'exploitation de ces leviers pour atteindre les objectifs fixés en matière d'artificialisation des sols ; par exemple, l'objectif ZAN 2050.

Nous avons choisi dans ce modèle de tester ou de discuter l'effet de plusieurs mesures, regroupées en 3 grandes catégories : mesures législatives, mesures fiscales, et autres.

- **Les mesures législatives**

Le 4 mai 2021, l'Assemblée nationale française adoptait en première lecture le **projet de loi Climat Résilience** [21]. Ce dernier comprend tout un volet sur la lutte contre l'artificialisation des sols, et fixe un **objectif chiffré** de réduction de moitié du rythme d'artificialisation dans les 10 années suivant la promulgation de la loi, par rapport aux 10 années précédentes (Article 47). Notre modèle étant essentiellement prospectif, les mesures législatives étudiées sont toutes issues de ce projet de loi. Nous estimons en effet que les mesures issues de lois précédentes sont déjà implémentées et donc contribuent aux chiffres utilisés pour calibrer le modèle.

Nous ne retiendrons pas les articles 48, 49 et 50, qui détaillent respectivement les leviers, les modalités d'entrée de cet objectif dans les documents d'urbanisme et le contrôle applicable. L'article 51 quant à lui instaure une densité minimale de construction au sein des Grandes Opérations d'Urbanismes. Or, le territoire national ne compte à ce jour que 12 projets partenariaux d'aménagement, et ne disposant pas de plus d'informations sur les surfaces concernées et la densité minimale envisagée, nous n'étudions pas l'effet de cette mesure, probablement marginal.

Nous étudions donc essentiellement l'effet des mesures contenues dans les articles 52 et 53 du projet de loi climat.

Le premier énonce que "L'autorisation d'exploitation commerciale ne peut être délivrée pour une implantation ou une extension qui engendrerait une artificialisation des sols", sauf certaines exceptions applicables uniquement aux locaux de moins de 10.000 m². Ainsi, les quantifications présentes en page 65 de l'étude d'impact du projet de loi [22] permettent de **traduire cette mesure en hectares non artificialisés**. Par exemple, les entrepôts de plus de 10.000 m² représentant 214 hectares de bâti par an, la mise en place de cette mesure permet de diminuer la surface artificialisée chaque année d'au moins 214 hectares. A cette diminution s'ajoute celle engendrée par la non construction de certains locaux de

moins de 10.000 m², qui est modélisée par un pourcentage ajustable d'acceptation des dossiers par la CNAC.

Le second la prise en compte de la vacance au sein des Zones d'Activités Économiques. L'étude d'impact de la loi estime qu'il existe environ 30 000 ZAE réparties sur le territoire national, ce qui représente une surface 450 000 hectares. L'application d'un taux de vacance à cette surface permet d'obtenir une **surface potentielle de renouvellement urbain ou de renaturation**.

- **Les mesures fiscales**

Ces mesures sont souvent non quantifiables, mais permettent de nourrir la discussion. Elles se séparent en deux groupes : celles qui sont déjà envisagées/ en place, et celles qui n'existent pas en France mais pourraient être envisagées pour renforcer l'usage de certains leviers.

En première catégorie, on trouve les aides présentes dans le plan de relance. Pour accompagner les élus dans leur effort de construction dense, il est prévu, dans le cadre du plan de relance et plus particulièrement du projet de loi de finances pour 2021, une « aide à la relance de la construction durable », de 350 millions d'euros sur deux ans. Cette aide ne peut être obtenue qu'en respectant un seuil de densité minimal fixé par catégorie de commune, pour les habitats collectifs uniquement. Cette aide tend donc à augmenter le facteur de **densification pour les nouvelles constructions**. Le plan contient également une aide pour la réhabilitation des friches ; cette dernière permettra donc d'**augmenter** le taux de **renouvellement urbain des friches** présentent sur le territoire. Ces idées permettent de renforcer la crédibilité de certains paramètres ajustables proposés dans le modèle.

En seconde catégorie, on peut envisager une taxe sur le modèle des écopoints allemands, sorte de **taxe sur le sol**, avec l'objectif d'augmenter la renaturation du sol. Les projets « nécessitant des mesures de compensation pour la nature conformément à la loi nationale pour la conservation de la nature coûtent des écopoints » [23]. Ces projets doivent contenir une justification des mesures utilisées pour compenser l'artificialisation qu'ils génèrent. Les écopoints peuvent être achetés auprès d'agences de compensation. L'application de cette mesure à la ville de Dresde a permis une réduction de l'imperméabilisation des sols de la ville par, en moyenne, quatre hectares chaque année. Le système des écopoints a comme avantage qu'il facilite l'exécution de grands projets en regroupant les mesures de compensation. De plus, les procédures administratives deviennent plus simples et transparentes. Cependant, les mesures de compensation peuvent agir sur des impacts différents de l'artificialisation et l'imperméabilisation. Il s'agit d'une mesure applicable au moyen et long-terme.

- **Autres**

Les programmes de renouvellement urbain par l'ANRU (Agence Nationale pour la Rénovation Urbaine)

L'ANRU est opérateur des programmes urbains et l'ensemble de ces programmes concerne 5 millions d'habitants en France. Deux programmes peuvent concerner notre sujet :

- PNRU (Programme National de Rénovation Urbaine)
Le PNRU a été lancé en 2004, selon la loi du 1er août 2003, pour la rénovation urbaine. L'objectif principal de ce projet était la transformation des quartiers les plus fragiles classées en ZUS (Zone Urbaines Sensibles). Ce projet a concerné 4 millions d'habitants dans 600 quartiers rénovés en France et en Outre mer.
- NPNRU (Nouveau Programme National de Rénovation Urbaine)

Le NPNRU a été lancé après le PNRU et cela concerne 3 millions d'habitants dans 216 quartiers d'intérêt national et 264 quartiers d'intérêt régional. De plus, près de 50% des projets concernent des petites ou moyennes villes comme moins de 100.000 habitants. **C'est-à-dire que la moitié de ce projet concerne les villes de moins de 100.000 habitants et la moitié restante concerne celles de plus de 100.000 habitants.** De plus, 85% des communes de projet le NPNRU étaient déjà concernées par le PNRU.

Ces programmes concernent un renouvellement urbain différent de celui évoqué comme levier du modèle, puisqu'il s'agit d'un embellissement et d'une sécurisation de quartiers dits "sensibles", et non pas d'éviter de l'artificialisation. Cependant, il n'est pas inenvisageable de voir ce type de programme évoluer pour lutter contre l'artificialisation des sols en encourageant le renouvellement. Nous verrons plus tard si ce levier est suffisamment efficace pour appeler de tels programmes à émerger.

L'augmentation du prix du foncier agricole

Selon la recherche de BNP Paribas wealth management, le prix d'un hectare de foncier agricole français était de 6.270 € en 2018. Ce prix est moyen en France, et il est bas par rapport aux autres pays européens comme l'Allemagne et le Royaume-Uni. Avec ce résultat, nous avons initialement pensé que si l'on augmentait le prix du foncier agricole, l'artificialisation pourrait reculer car il serait plus compliqué de constituer des réserves foncières sur ces terres. Si cette idée n'est pas erronée, il s'avère que cela aurait un impact négatif sur les petits exploitants familiaux et donc le modèle agricole français dans son ensemble (d'après l'entretien avec M. Julien Fosse). C'est pourquoi nous ne pensons pas que l'augmentation du prix du foncier agricole soit une idée pertinente, bien qu'elle revienne souvent lors des discussions sur la lutte contre l'artificialisation des sols ; nous ne la discuterons pas davantage dans ce rapport.

III. Résultats

Tout d'abord, il est essentiel de rappeler l'intérêt de notre modèle. Ce dernier doit permettre de mesurer quantitativement les effets de certaines mesures sur la réduction de la surface artificialisée d'ici à 2050. Cela doit permettre d'orienter la décision en comparant les impacts afin de dégager des priorités dans les choix. Il s'agit d'arbitrer entre l'efficacité de la mesure et sa probabilité de mise en œuvre selon différents facteurs (acceptabilité sociale, coût financier, ...). Enfin, le modèle doit être simple d'utilisation avec des paramètres en entrée modifiables, facilement compréhensibles, par exemple un nombre d'étages supplémentaires des bâtiments collectifs. Nous avons essayé de rendre les résultats de sortie perceptibles avec une comparaison au réel car selon nous les chiffres de l'artificialisation sont trop souvent éloignés de grandeurs intelligibles ce qui nuit à la prise en compte des effets. Nous nous sommes rapprochés de certaines grandeurs plus réalistes et sensibles, comme la surface de Paris.

1) Principaux résultats : effets différenciés des mesures

Dans un premier temps, nous avons mesuré les effets des mesures et leviers séparément les uns des autres. Certaines mesures se sont avérées très efficaces conformément à la littérature et à nos espérances. En revanche, d'autres ont des effets très limités.

Proportion logements collectifs et individuels :

La comparaison de l'artificialisation des sols induite par un logement individuel et un logement collectif (comprenant les infrastructures, les équipements, ...), respectivement 1918 m² et 919 m², laissait penser que réduire la proportion des logements individuels ferait chuter la part d'artificialisation. Cela est d'autant plus vrai que la proportion de logements individuels dépasse les 79% dans toutes les zones Otelo sauf la zone 1 qui correspond aux principaux pôles urbains.

Nous avons diminué par 1.5 la proportion des logements individuels dans les zones très denses, 2.5 dans les zones denses et 2 dans les zones rurales. La réduction d'artificialisation est de 13.75% de la surface totale artificialisée en 2050 par rapport au scénario de référence "business as usual". Cette grandeur représente 71 fois la surface de Paris. La proportion de logements collectifs et individuels est donc très efficace pour lutter contre l'artificialisation.

Augmentation du nombre d'étages des logements collectifs :

Selon nous, cette mesure allait faire diminuer la surface artificialisée car elle traduit directement la notion de densité et d'« intensification » des pratiques comme le recommande M. Grisot (livre). Mais dans la pratique, les changements observés sont assez faibles. En effet, une **augmentation du nombre d'étages de 4 dans les zones très denses, 3 dans les zones denses et de 3 dans les zones rurales** entraîne seulement une **réduction de l'artificialisation de 0.85%** par rapport au scénario business as usual alors que la politique est plus que volontariste. Cela est dû au fait que la proportion de logements collectifs est faible dans la plupart des zones comme évoqué précédemment. On peut y voir une forme d'échec de la Loi pour l'Accès au Logement et à un Urbanisme Rénové ALUR de 2014 qui avait supprimé le COS pour permettre notamment de surélever de nombreux logements collectifs de plusieurs étages [24] comme l'envisage l'API [25]. Ainsi, il sera intéressant de coupler cette politique avec une augmentation de la proportion de logements collectifs pour voir le potentiel de ces mesures combinées.

Diminution de la taille des logements :

Une diminution de la taille des logements se traduit directement par une diminution de la surface artificialisée consacrée au logement et par extension de la surface totale. Nous avons appliqué une **réduction de la taille de 5% dans les zones très denses, 15% dans les zones denses et 10% dans les milieux ruraux**. La réduction observée est en-deçà de nos attentes avec **4.53% de surface artificialisée en moins** que dans le scénario de référence soit 23 fois la surface de Paris malgré des réductions significatives de la taille des logements. L'acceptabilité sera discutée par la suite.

Taux de renouvellement :

Ce levier est central dans notre projet car il impacte directement la demande d'artificialisation. Nous avons testé différentes augmentations du taux de renouvellement urbain en point de pourcentage, le taux moyen de référence étant de 43%. Ainsi, appliquer une augmentation de 10% dans les zones rurales signifie que le nouveau taux de renouvellement est de 53% dans ces milieux. Nous avons testé les augmentations de taux suivantes : **zones très denses 30%, denses 10%, rurale 5%**. La réduction est

très importante avec **14.51%** soit 75 fois la surface de la ville de Paris. Le résultat est particulièrement sensible au taux de renouvellement en zones denses comme le montre le tableau en annexe 3.

Réduction du taux de vacance des logements :

Cette mesure rejoint la sous-utilisation des logements fréquemment évoquée notamment due à la diminution du nombre de personnes par ménage ou à l'explosion de certaines plateformes comme Airbnb qui retirent des logements du parc, très pénalisantes dans des zones où le marché du logement est tendu comme Paris. D'ailleurs, la lutte contre ces plateformes était au cœur du débat du dernier Conseil de Paris [26]. Il est d'autant plus intéressant de quantifier le potentiel de ce levier. Avec des efforts de réduction de la vacance assez importants (**diminution par 2 pour zones denses, 4 pour zones très denses, 1,2 pour zones rurales**), on a un recul de l'artificialisation assez limité de **4.47%**.

Interdiction des surfaces commerciales de plus de 10 000 m² et lutte contre la vacance des commerces :

A l'instar de la vacance des logements nous avons souhaité réduire celle des commerces, estimée autour de 10% [27]. De même, nous avons testé la proposition de l'article 52 du projet loi Climat à savoir interdire les nouvelles zones d'activité de plus de 10 000 m². **La vacance des commerces a été réduite par 4 en zones très denses, 2 en zones denses et 1,2 en zones rurales.** Au total, **la surface artificialisée a reculé de 2.42%** en 2050 soit 13 fois la surface de Paris. Il y a donc un effet assez limité qui s'explique par le fait que les commerces ne représentent que 14% de l'artificialisation et que la vacance ne concerne que 10% des commerces.

Si l'on interdit en plus les surfaces de plus de 10 000 m², la **réduction atteint 2.55% car ces espaces artificialisent 214 ha/an** (comme indiqué dans l'étude d'impact du projet de loi climat et résilience). Ainsi, l'effet de ces zones commerciales est marginal. Cependant, elles sont essentiellement nocives, non pas à cause de leur surface, mais du type d'artificialisation qu'elles induisent car il s'agit dans la quasi-totalité des cas d'une artificialisation de masse en discontinuité du bâti. Les dommages pour la biodiversité, le besoin en infrastructures routières et l'augmentation des longueurs de trajets causés par ces zones sont donc très importants.

Renaturation :

Nous avons mesuré les effets de la renaturation en prenant en compte deux sources principales : les friches industrielles et les surfaces commerciales vacantes. Nous avons également pensé aux surfaces de jardins et de parcs dans les zones urbaines, considérées comme des surfaces artificialisées, avant de nous rétracter. En effet, la littérature et les entretiens tendent à montrer qu'une partie des surfaces de parcs et de jardins sont plus bénéfiques pour l'environnement (pour l'absorption de CO₂ et la biodiversité) que les espaces naturels. Avec une **renaturation annuelle de 2% de la surface des friches et de 2% des surfaces de commerces vacantes, l'artificialisation en 2050 diminue de 2.07%** soit 10.8 fois la surface de Paris. L'effet est donc assez faible mais présente l'avantage d'être constant dans le temps et indépendant des autres mesures. Le potentiel de renaturation est plus important du côté des friches que des commerces vacants comme le montre le tableau en annexe 4.

2) Principaux résultats : effets combinés des mesures

Nous avons croisé les précédents paramètres pour voir lesquels il était préférable d'appliquer conjointement ou séparément. Cette analyse a montré que la plupart des effets se cumulent simplement sans interagir comme le taux de renouvellement et de la renaturation ou bien la vacance des commerces et celle des logements. En revanche, d'autres donnent des résultats différents de la simple somme des effets.

C'est le cas de la proportion de logements collectifs et du nombre d'étages. En prenant les mêmes hypothèses que précédemment (**+ 4 étages zone très dense, + 3 zone dense, + 3 zone rurale et une diminution par 1.5 de la proportion de logements individuels en zone très dense, par 2.5 en zone dense, par 2 en zone rurale**), **la surface artificialisée en 2050 est réduite de 17.21%** soit 89 fois la surface de Paris. Or, le nombre d'étages réduit la surface de 0.85% et la proportion de logements individuels de 13.75%. Il y a donc un gain de 2.61% par rapport à la somme des effets. Ce résultat est logique car les gains de l'ajout d'étages sont d'autant plus grands que le nombre de logements sur lesquels il s'applique est grand, à savoir le nombre de logements collectifs.

Cependant, en diminuant en plus la taille des logements (**de 5% en zones très denses, 15% en zones denses et 10% en zones rurales**), **la diminution est de 19.70%, soit une réduction de l'artificialisation supplémentaire de 2.7%**. Or, réduire la taille des logements fait reculer l'artificialisation de 4.53% lorsque la mesure est appliquée seule. Il y a une perte relative d'efficacité car la réduction de la taille des logements est plus efficace sur les logements individuels, plus grands. Ainsi, diminuer la part des logements individuels atténue l'efficacité de cette mesure même si elle reste pertinente. En annexe 5, se trouve le résumé des hypothèses et des résultats.

IV. Discussion

1) Analyse des mesures

Nous prévoyons ici une discussion des bonnes pratiques pour respecter la trajectoire Zéro Artificialisation Nette du gouvernement, des réglementations existantes pour freiner l'artificialisation (leur efficacité et leurs limites), etc. :

Mesures qui induisent des changements de modes de vie : le frein social

- Proportion de logements collectifs et individuels

Selon nous, cette politique a un vrai potentiel notamment dans les zones péri-urbaines où la proportion de logements individuels et les surfaces artificialisées par logement individuel sont les plus grandes. En revanche, elle nous semble difficilement applicable dans la mesure où les gens choisissent de vivre dans les zones péri-urbaines spécifiquement pour ces logements. Ce levier réinterroge totalement le modèle de fabrication de la ville et l'idéal du pavillon.

- Nombre d'étages des logements collectifs

Cette mesure n'est pas adaptée si elle est appliquée seule car, malgré l'augmentation forte du nombre d'étages, elle ne réduit que marginalement l'artificialisation. De plus, elle tend à créer un sentiment de densification très important chez la population qui nuit à son acceptabilité. Un vrai travail sur l'architecture et l'aménagement des espaces publics est donc nécessaire pour la rendre applicable.

- ***Diminution de la taille des logements***

La réduction de l'artificialisation était inférieure à nos attentes avec une réduction de 4.53% pour des logements de 5 et 15% plus petits. On pense donc qu'il est préférable de peu jouer sur ce paramètre dans les futurs scénarios car une diminution de cette importance semble difficilement acceptable. En effet, en milieu dense la réduction est de 15% soit la surface d'une chambre pour une maison de 70 m².

- ***Application simultanée des mesures***

Réduire la proportion de logements individuels et augmenter le nombre d'étages sur les logements collectifs ont des effets croisés vertueux. En combinant ces deux éléments avec la réduction de la taille des logements, on atteint quasiment 20% d'artificialisation en moins. Cependant, prises individuellement, ces mesures ont toutes une acceptabilité sociale dont on peut douter. Il paraît aujourd'hui presque impensable d'envisager qu'elles soient appliquées simultanément. Il faudrait donc soit une volonté très forte de la part de la classe dirigeante soit un changement de paradigme et d'idéal de logement pour que ces mesures soient mises en place.

- ***Renaturation :***

La renaturation a un potentiel limité même si elle comporte l'avantage d'être indépendante des autres mesures. De même, elle n'impose pas de changements de comportements des personnes, elle dépend uniquement de la puissance publique. En revanche, cette politique a un coût assez élevé, estimé entre 240 milliards d'euros et 290 milliards d'euros d'ici à 2050 pour des taux de renaturation de 2% par an. On voit que ces coûts sont extrêmement importants et bien loin des 300 millions d'euros prévus dans le plan de relance pour le fonds friches. Le frein n'est donc pas d'ordre social ici mais financier.

Mesures sans changements de modes de vie : freins économiques

- ***Augmentation du taux de renouvellement urbain***

Ce levier a montré des résultats très prometteurs avec un recul de l'artificialisation important malgré des hypothèses qui semblent tout à fait réalistes. Par exemple, augmenter le taux de renouvellement de 20% dans toutes les zones réduirait la surface artificialisée de 14.30% soit 74 fois la surface de Paris. De plus, elle est uniquement dans les mains de la puissance publique i.e. les citoyens n'ont pas à changer leur mode de vie. Ainsi, la proposition de la convention citoyenne pour le climat concernant l'obligation de construire en renouvellement si du foncier est disponible nous paraît être une excellente initiative, s'inspirant de la Green Belt britannique [28].

Cependant, le coût est le défaut majeur de ce levier. La construction en renouvellement est bien plus chère que sur des terrains nus pour plusieurs raisons :

- La différence de coût du foncier entre des zones urbanisées et rurales
- La complexité des travaux bien supérieure lorsqu'il faut prendre en compte les bâtiments environnants, des réseaux plus denses, ...
- Les coûts de démolition

Ainsi, si la puissance publique décide d'imposer des taux de renouvellement plus élevés, les coûts des opérations devront être également discutés dans les projets de loi. Dans le cas contraire, certaines opérations pourraient ne pas voir le jour car non rentables avec un risque de tension forte du marché de logements. D'autres pourraient faire peser le coût sur le consommateur final (citoyen) et creuser les inégalités.

Mesures sans changements de modes de vie : manque de connaissances

- Taux de vacance des logements et des commerces

Cette mesure a montré des effets non négligeables même si assez faibles par rapport à d'autres leviers notamment le taux de renouvellement. Cependant, même si les effets sont moindres, réduire la vacance des logements n'est pas une mesure qui coûte de l'argent. Au contraire, elle permettrait de réduire les dépenses sur l'ensemble de la chaîne de production urbaine avec des constructions de logements, d'infrastructures et d'équipements publics en moins.

Le constat est similaire pour la vacance des commerces. La réduction par 4 de la vacance dans les zones très denses, 2 dans les zones denses et 1.2 dans les zones rurales peut paraître ambitieuse mais elle est atteignable selon nous dans la mesure où l'interdiction de la construction de surfaces commerciales de plus de 10 000 m² va s'accompagner d'un besoin fort en commerces de tailles plus petites. De plus, cette mesure ne demande pas d'effort de la part des habitants. Au contraire, elle peut tendre à répondre à plusieurs problèmes en redynamisant les commerces de proximité par exemple et répondre à deux problèmes à la fois : celui de l'artificialisation et de la désertion des centres-villes.

Cependant, il ne semble pas aujourd'hui exister de moyens efficaces et sûrs de lutter contre la vacance des logements et des commerces. Certains programmes comme Action Cœur de Ville visent à attirer les habitants et commerces dans les centres-villes des villes moyennes qui souffrent aujourd'hui de la vacance. Le recul est insuffisant sur ce genre d'initiatives (Action Cœur de Ville lancé en décembre 2017) pour déterminer leur efficacité.

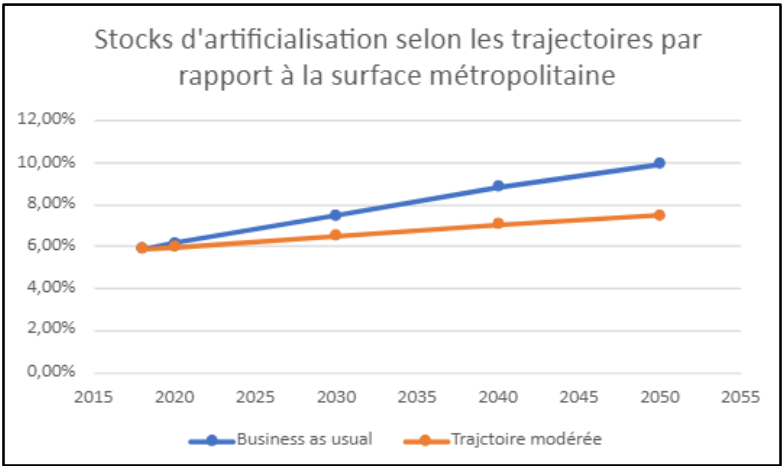
2) Scénarios

- **Scénario réaliste**

Nous avons essayé de développer un scénario pour lequel les hypothèses appliquées nous paraissent réalistes dans une logique volontariste de réduction de l’artificialisation. Les hypothèses retenues sont affichées dans le tableau à droite.

On observe une réduction de l’artificialisation de 25% au total soit 127 fois la surface de Paris. Cette diminution est très importante et s’accompagne donc d’effets extrêmement bénéfiques en ce qui concerne les problèmes liés à l’artificialisation, évoqués précédemment. Le rythme de l’artificialisation est représenté dans le graphique suivant :

Proportion de logements collectifs/individuels - Facteur de diminution de la proportion de logements individuels		Taux de renouvellement - Augmentation du taux de renouvellement en point de pourcentage	
Zone très dense	1,2	Zone très dense	10%
Zone dense	2	Zone dense	25%
Zone rurale	1,8	Zone rurale	20%
Taille des logements - Facteur de réduction de la taille		Taux de vacance des logements - Facteur de réduction de la vacance des logements	
Zone très dense	2%	Zone très dense	2,5
Zone dense	5%	Zone dense	2
Zone rurale	5%	Zone rurale	1,2
Nombre d'étages - Nombre d'étages supplémentaires pour les logements collectifs		Taux de vacance des surfaces commerciales - Diminution annuelle du taux de vacances	
Zone très dense	3	Zone très dense	0,05%
Zone dense	2	Zone dense	0,05%
Zone rurale	2	Zone rurale	0,05%
		Pourcentage des zones commerciales de plus de 10 000m² autorisées	0%
		Renaturation - Pourcentage de renaturation annuelle	
		Friches industrielles	0,1%
		Surfaces commerciales vacantes	0,1%



On constate que l’objectif de ZAN n’est pas atteint (le flux d’artificialisation net est réduit de “seulement” 66 % en 2050), l’artificialisation continue de croître à travers le temps. Les hypothèses doivent donc être renforcées. Ici, le coût de la renaturation pour cette opération est compris entre 180 milliards et 215 milliards d’euros d’ici à 2050 [29].

- **Scénario de ZAN :**

Une partie centrale de notre travail est de déterminer une stratégie potentielle pour atteindre l’objectif de ZAN. Il existe bien sûr plusieurs trajectoires possibles pour atteindre le ZAN mais nous avons essayé d’en construire une qui nous semble plausible en jouant au maximum sur les paramètres les plus efficaces et qui ne changent pas les comportements individuels. Nous avons testé différents scénarios et retenu les paramètres affichés dans le tableau suivant.

Ces paramètres-ci nous permettent d'atteindre le ZAN en 2050. La réduction de l'artificialisation totale est de 40.27% par rapport au scénario de référence soit 209 fois la surface de Paris, et on obtient bien un flux d'artificialisation net nul en 2050.

Proportion de logements collectifs/individuels - Facteur de diminution de la proportion de logements individuels		Taux de renouvellement - Augmentation du taux de renouvellement en point de pourcentage	
Zone très dense	2,5	Zone très dense	35%
Zone dense	3	Zone dense	40%
Zone rurale	3	Zone rurale	40%
Taille des logements - Facteur de réduction de la taille		Taux de vacance des logements - Facteur de réduction de la vacance des logements	
Zone très dense	7%	Zone très dense	4
Zone dense	15%	Zone dense	2
Zone rurale	15%	Zone rurale	2
Nombre d'étages - Nombre d'étages supplémentaires pour les logements collectifs		Taux de vacance des surfaces commerciales - Diminution annuelle du taux de vacances	
Zone très dense	6	Zone très dense	0,10%
Zone dense	3	Zone dense	0,10%
Zone rurale	3	Zone rurale	0,10%
		Pourcentage des zones commerciales de plus de 10 000m ² autorisées	0%
		Renaturation - Pourcentage de renaturation annuelle	
		Friches industrielles	3,0%
		Surfaces commerciales vacantes	3,0%

Cependant, même en optimisant le choix des leviers, on peut douter qu'un tel scénario puisse être applicable à plusieurs titres. En effet, les hypothèses concernant des paramètres qui induisent des changements de comportements individuels sont assez fortes. Par exemple, en zones denses, la part de logement individuel devra être divisée par 3, les logements 15% plus petits et les logements collectifs auront en moyenne 3 étages supplémentaires. Ceci paraît être difficilement envisageable. De même, les autorités devront également mener une action très volontariste pour remplir les objectifs. L'augmentation des taux de renouvellement d'au minimum 40% (pour passer de 43% aujourd'hui à 83%) entraînera un surcoût très important des opérations d'aménagement. Enfin, cette action doit être couplée avec une politique de renaturation très importante avec des taux de renaturation de 3% annuels pour les friches et

les commerces. Celle politique coûterait entre 370 milliards et 450 milliards d'euros selon l'Assemblée des communautés de France [29], bien loin des 300 millions pour le fonds friches du plan de relance. Bien entendu, le plan de relance s'étend sur 1 ou 2 ans seulement. Mais, même en multipliant ce fond exceptionnel par 30, le montant n'est pas suffisant. On peut également mettre ces chiffres en perspective avec le poids du marché de la construction, qui était de 150 milliards d'€ en 2019. Dégager 10 milliards par an jusqu'en 2050 va demander des sacrifices considérables et ne se fera pas sans une pression forte des pouvoirs publics.

3) Recommandations

En prenant en compte d'un côté l'efficacité des mesures et de l'autre leur applicabilité, on peut dégager quelques axes principaux d'action pour la puissance publique. Tout d'abord, il paraît indispensable d'agir sur deux éléments : la proportion de logements individuels et le taux de renouvellement. Ces deux éléments comportent des freins différents que l'Etat et les collectivités doivent dépasser pour réduire efficacement l'artificialisation. Cela peut par exemple passer par un encadrement réglementaire des opérations d'aménagement et une réflexion autour du surcoût lié au renouvellement urbain. Cependant la diminution de la part du logement individuel ne peut se faire que si les ménages changent leurs habitudes de consommation. Selon Julien Fosse, changer les mentalités autour du choix du logement pourrait avoir des effets considérables. En 2021, habiter dans une maison est encore vu comme une réussite sociale, d'autant plus quand on en est propriétaire. Augmenter la sensibilisation sur les atteintes sur l'environnement du logement individuel, notamment en lotissement, pourrait infléchir cette tendance et diminuer la demande sur ce type de bien.

Une fois ces deux piliers mis en place, la priorité peut être donnée à la vacance des logements et des surfaces commerciales et à l'élévation des logements collectifs. Enfin, l'objectif de ZAN ne pourra être atteint sans une action en faveur de la renaturation de certaines surfaces. Nous suggérons d'agir sur les friches et les surfaces commerciales vacantes. Malgré les incertitudes sur les coûts de la renaturation, nous suggérons de commencer au plus tôt des initiatives de la sorte afin de gagner rapidement en expérience et en recul sur le domaine. D'ailleurs, certains organismes tentent d'établir des connaissances plus solides sur les potentiels de renaturation comme le Cerema qui a développé Cartofriches, un outil d'identification des friches industrielles pour aider à leur traitement et ainsi lutter contre l'étalement urbain. Cela permettra à la puissance publique de pouvoir rapidement déterminer une stratégie de ZAN en connaissance de cause.

Enfin, notre modèle prend en compte l'ensemble des leviers et mesures dont les effets sont connus et quantifiés. Or, de nombreuses initiatives ont encore des effets qui ne sont pas connus, par manque de recul et de connaissances. On trouve par exemple les changements de fiscalité sur les terres agricoles, les fonds alloués par le plan de relance pour subventionner la construction dense (350 millions d'euros sur deux ans) et le renouvellement des friches ou bien les changements des prix du foncier agricole. De plus, les impacts réels de l'artificialisation sont également encore mal connus. Il serait utile de développer des méthodologies pour quantifier plus précisément les impacts de l'artificialisation, notamment en améliorant la connaissance des mécanismes de la biodiversité. Il faudrait trouver des moyens pédagogiques d'expliquer ces impacts et de communiquer les formes d'aménagement de surfaces naturelles qui sont les plus bénéfiques, et au contraire les aménagements urbains les plus néfastes. Cela permettrait aussi de trouver des manières optimales de renaturer et de revitaliser la biodiversité, pour imposer des mesures de compensation plus efficaces et moins contraignantes arrivant à un même résultat.

Notre travail sera adapté par Rémi Babut (Shift Project) pour faire partie du Plan de transformation de l'économie française. Il permettra d'évaluer les impacts du scénario prospectif du Shift Project en termes d'usage des sols en France.

Notre travail pourrait également être la base d'un outil utile pour les élus et les aménageurs. Reprendre notre démarche à l'échelle d'une ville ou d'un territoire restreint, avec des chiffres plus spécifiques permettrait de développer des prédictions assez précises sur ce territoire. Cela aiderait les décideurs à

- développer des stratégies territoriales en cohérence avec la loi climat en sachant quels leviers ils doivent actionner
- savoir quelle surface ils doivent renaturer pour répondre aux objectifs

Enfin, notre travail, repris par un organisme, pourrait servir d'outil de communication à destination des acheteurs et des consommateurs. Nous avons soulevé l'importance des changements de choix de consommation dans l'usage des sols, et il faut pour cela apporter des informations supplémentaires aux citoyens. Connaître les ordres de grandeurs des impacts environnementaux de leur choix de logement les aiderait à en tenir compte, et à peut-être remettre en cause le rêve français du pavillon en banlieue.

Bibliographie

- [1] Observatoire de l'artificialisation, « Portail de l'artificialisation des sols », *Portail de l'artificialisation*. <https://artificialisation.biodiversitetousvivants.fr/portail-lartificialisation-des-sols>
- [2] C. Albizzati, M. Poulhes, et J. Sultan Parraud, « Caractérisation des espaces consommés par le bâti en France métropolitaine entre 2005 et 2013 ». Insee References, 2017. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.insee.fr/fr/statistiques/3280938?sommaire=3280952>
- [3] A. Colsaet, « Gérer l'artificialisation des sols : Une analyse du point de vue de la biodiversité », Institut du développement durable et des relations internationales (Iddri), Paris, France, 2017. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-28498-rapport-iddri-artificialisation.pdf>
- [4] Commissariat général au développement durable, « Théma - Trajectoires vers l'objectif zéro artificialisation nette ». 2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Th%C3%A9ma%20-%20Trajectoires%20vers%20l%E2%80%99objectif%20z%C3%A9ro%20artificialisation%20nette.pdf>
- [5] Gouvernement (République française), « Artificialisation des sols. Les nouveaux indicateurs. », *Gouvernement.fr*, 2016. <https://www.gouvernement.fr/indicateur-artificialisation-sols>
- [6] Commissariat général au développement durable, « Théma - Objectif “zéro artificialisation nette”. Éléments de diagnostic ». 2018.
- [7] Observatoire du développement durable, « Méthode pour l'estimation de l'artificialisation des sols (et de la consommation des terres agricoles) Méthodes, données et pistes d'utilisation ». 2015. [En ligne]. Disponible sur: https://odr.inra.fr/intranet/carto_joomla/index.php/ressource/publications-odr/1108-methode-pour-lestimation-de-lartificialisation-des-sols/file
- [8] « Observatoire de l'artificialisation ». <https://artificialisation.biodiversitetousvivants.fr/determinants-artificialisation-2009-2018>
- [9] S. Grisot, *Manifeste pour un urbanisme circulaire*, Editions Apogée. 2021.
- [10] J. Fosse, « Objectif « Zéro artificialisation nette » : quels leviers pour protéger les sols ? », France Stratégie, 2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/fs-rapport-2019-artificialisation-juillet.pdf>
- [11] Ministère de la Transition Ecologique, « Artificialisation des sols », *Ministère de la Transition écologique*. <https://www.ecologie.gouv.fr/artificialisation-des-sols>
- [12] W. Boulila, I. R. Farah, K. S. Ettabaa, B. Solaiman, et H. B. Ghézala, « A data mining based approach to predict spatiotemporal changes in satellite images », *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation*, vol. 13, n° 3, p. 386- 395, juin 2011, doi: 10.1016/j.jag.2011.01.008.
- [13] M. J. Aitkenhead et I. H. Aalders, « Predicting land cover using GIS, Bayesian and evolutionary algorithm methods », *J. Environ. Manage.*, vol. 90, n° 1, p. 236- 250, janv. 2009, doi: 10.1016/j.jenvman.2007.09.010.
- [14] C. He, N. Okada, Q. Zhang, P. Shi, et J. Zhang, « Modeling urban expansion scenarios by coupling cellular automata model and system dynamic model in Beijing, China », *Appl. Geogr.*, vol. 26, n° 3- 4, p. 323- 345, oct. 2006, doi: 10.1016/j.apgeog.2006.09.006.
- [15] G. Caruso, D. Peeters, J. Cavailhès, et M. Rounsevell, « Spatial configurations in a periurban city. A cellular automata-based microeconomic model », *Reg. Sci. Urban Econ.*, vol. 37, n° 5, p. 542- 567, sept. 2007, doi: 10.1016/j.regsciurbeco.2007.01.005.
- [16] O. Barreteau, F. Bousquet, C. Millier, et J. Weber, « Suitability of Multi-Agent Simulations to study irrigated system viability: application to case studies in the Senegal River Valley », *Agric. Syst.*, vol. 80, n° 3, p. 255- 275, juin 2004, doi: 10.1016/j.agsy.2003.07.005.
- [17] R. G. Lathrop, D. L. Tulloch, et C. Hatfield, « Consequences of land use change in the New York–New Jersey Highlands, USA: Landscape indicators of forest and watershed integrity », *Landsc. Urban Plan.*, vol. 79, n° 2, p. 150- 159, févr. 2007, doi: 10.1016/j.landurbplan.2006.02.008.
- [18] M. Kohler, C. Tannier, N. Blond, R. Aguejdad, et A. Clappier, « Impacts of several urban-sprawl countermeasures on building (space heating) energy demands and urban heat island intensities. A case study », *Urban Clim.*, vol. 19, p. 92- 121, janv. 2017, doi: 10.1016/j.uclim.2016.12.006.
- [19] J. Anand, A. K. Gosain, et R. Khosa, « Prediction of land use changes based on Land Change Modeler and attribution of changes in the water balance of Ganga basin to land use change using

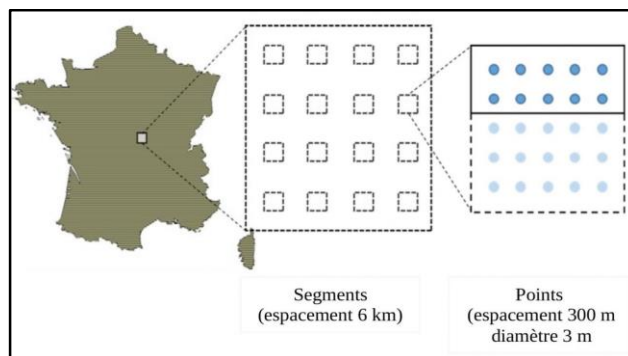
- the SWAT model », *Sci. Total Environ.*, vol. 644, p. 503- 519, déc. 2018, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.017.
- [20] « Projections démographiques de l'Insee ». <https://www.insee.fr/fr/statistiques/1371861?sommaire=1371865&q=projections+d%C3%A9mographiques>
- [21] A. Nationale, « Projet de loi n° 3875 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets », *Assemblée nationale*. https://www.assemblee-nationale.fr/dyn/15/textes/l15b3875_projet-loi (consulté le avr. 11, 2021).
- [22] « Etude d'impact du projet de loi climat résilience », p. 391- 508.
- [23] Commission européenne, *Lignes directrices concernant les meilleures pratiques pour limiter, atténuer ou compenser l'imperméabilisation des sols*. Luxembourg: Office des publications de l'Union européenne, 2012. [En ligne]. Disponible sur: https://ec.europa.eu/environment/soil/pdf/guidelines/pub/soil_fr.pdf
- [24] *LOI n° 2014-366 du 24 mars 2014 pour l'accès au logement et un urbanisme rénové (1)*. 2014.
- [25] Mairie de Paris, « Surélever son immeuble ». [En ligne]. Disponible sur: <https://api-site.paris.fr/images/85422>
- [26] « L'avis citoyen qui gêne la mairie de Paris contre Airbnb », *Challenges*. https://www.challenges.fr/politique/l-avis-citoyen-qui-gene-la-mairie-de-paris-contre-airbnb_761133 (consulté le juin 07, 2021).
- [27] Commerce, ville & territoire, « Observer la vacance et les dynamiques commerciales pour faire face à la crise ». 2020. [En ligne]. Disponible sur: https://www.cohesion-territoires.gouv.fr/sites/default/files/2020-08/CVT_Synthese_Webinaire%2024-06-2020_0.pdf
- [28] European commission, « Science for Environment policy. policies to limit urban sprawl compared ». [En ligne]. Disponible sur: https://ec.europa.eu/environment/integration/research/newsalert/pdf/39si3_en.pdf
- [29] Assemblée des communautés de France, « La revitalisation des friches industrielles. Enjeux et synthèse de 40 fiches-actions portées par les Territoires d'industrie ». 2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.adcf.org/files/DOCS/Note-friches-TI-AdCF-25102019-web.pdf>

Annexes

Annexe 1 : Autres méthodes de mesure et d'analyse de l'artificialisation des sols

- **Teruti Lucas**

Enquête annuelle réalisée par les services statistiques du ministère en charge de l'agriculture ayant pour objectif de suivre l'évolution de l'occupation et de l'usage des sols sur tout le territoire national, elle consiste à observer un ensemble de points représentatifs, puis extrapoler statistiquement les résultats à l'échelle départementale, régionale et nationale.



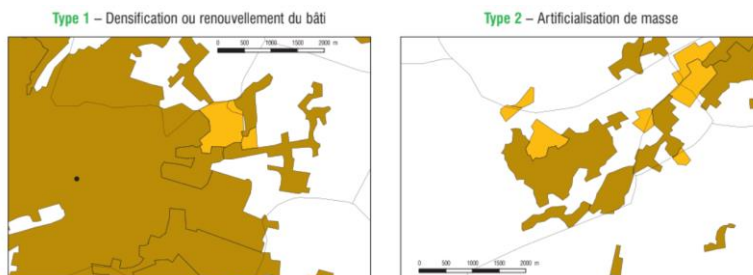
Méthodologie de collecte (Teruti-Lucas)

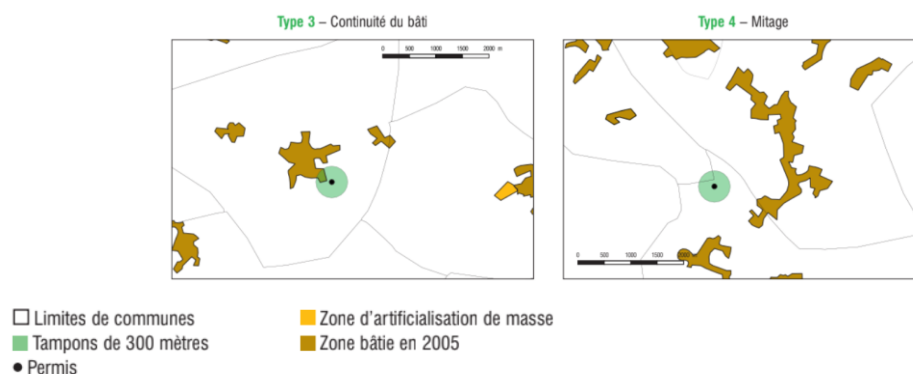
- **Observatoire de l'artificialisation**

Mis en place en 2019 dans le cadre du Plan biodiversité, il vise à répondre à l'objectif de suivi de la consommation d'espace pour constater l'évolution de l'artificialisation des sols à l'échelle de chaque commune. Les études menées par l'observatoire reposent sur le traitement des fichiers fonciers : seules les surfaces des parcelles cadastrées sont mesurées et additionnées. Certaines surfaces artificialisées ne sont donc pas prises en compte, notamment les infrastructures (rues, places publiques, routes nationales et départementales, voies communales et chemins ruraux...). Pour limiter la perte de précision due aux surfaces non prises en compte par le cadastre, les résultats sont exprimés en flux et non en stocks.

- **Insee**

L'Insee a produit en 2017 une étude sur les typologies que prend l'artificialisation en France. Plusieurs catégories sont donc différenciées (voir figure ci-dessous). Les chercheurs ont ici exploité des données cartographiques de l'IGN (base de données BD Carto) croisées avec des données Corine Land Cover, et la liste des permis de construire sur le territoire français.





Nomenclature (Insee)

• Analyse et prédiction

Le **monde scientifique** à l'international s'est également penché sur les problématiques d'artificialisation, et plus généralement d'usage des sols, depuis une dizaine d'années. Les modèles développés permettent de modéliser des évolutions de l'utilisation des sols d'un territoire à partir d'une carte de l'utilisation des sols à un moment donné. Ils peuvent être utilisés pour **expliquer rétrospectivement des phénomènes passés** d'étalement urbain, ou prévoir des **potentielles avancées de l'artificialisation** (et ses impacts). Ils peuvent se baser sur des technologies de modèles statistiques [12], [13], ou de modèles cellulaires [14] [15], ou encore de modèles multi-agents [16]. Dans le cas d'une utilisation prospective, des données supplémentaires peuvent être ajoutées au modèle pour affiner les résultats : par exemple des projets de transports en commun et des politiques publiques de l'habitat [17]. Enfin, ces modèles peuvent permettre de prédire également les impacts de l'artificialisation, par exemple à propos du climat et de la demande d'énergie [18] ou encore de l'accès à l'eau [19].

Annexe 2 : Correspondance entre les zonage Otelo, Insee, et les catégories utilisées dans notre modèle

Zone Otelo	Zone INSEE	Type de commune	Type de zone
1	200 000 - 2 000 000 habitants	+ 100 000 habitants hors Paris	Zone très dense
2	20 000 - 200 000 habitants	- 100 000 habitants	Zone dense
3	20 000 - 200 000 habitants	- 100 000 habitants	Zone dense
4	20 000 - 200 000 habitants	- 100 000 habitants	Zone dense
5	20 000 - 200 000 habitants	- 100 000 habitants	Zone dense
6	Hors aire urbaine	Rurale	Zone rurale
7	Hors aire urbaine	Rurale	Zone rurale

Annexe 3 : Résultats du test du levier “renouvellement”

Augmentation du taux de renouvellement en zone très dense	Augmentation du taux de renouvellement en zone dense	Augmentation du taux de renouvellement en zone rurale	Réduction de l'artificialisation
10%	20%	10%	11.36%
20%	10%	10%	9.78%

Annexe 4 : Résultats du test du levier “renaturation”

Renaturation annuelle de la surface de friches	Renaturation annuelle de la surface de commerces vacants	Réduction totale de l'artificialisation
2%	1%	1.74%
1%	2%	1.37%

Annexe 5 : Résumé des effets des leviers testés indépendamment

Levier / Mesure	Zone très dense	Zone dense	Zone rurale	Résultat
Facteur de diminution de la proportion de logements individuels	1.5	2.5	2	-13.75%
Nombre d'étages supplémentaires des logements collectifs	4	3	3	-0.85%

Pourcentage de réduction de la taille des logements	5%	15%	10%	-4.53%
Augmentation du taux de renouvellement en point de pourcentage	30%	10%	5%	-14.51%
Facteur de réduction de la vacance des logements	4	2	1.2	-4.47%
Facteur de réduction de la vacance des commerces	4	2	1.2	-2.42%
Pourcentage de surfaces commerciales de + de 10 000m ² interdites	100%	100%	100%	-0.13%
Taux de renaturation annuel des friches industrielles/des commerces vacants	2%/2%	2%/2%	2%/2%	-2.07%
Facteur de diminution de la proportion de logements individuels/ Nombre d'étages supplémentaires sur les logements collectifs	1.5 / 4	2.5 / 3	2 / 3	-17.21%
Facteur de diminution de la proportion de logements individuels/ Nombre d'étages supplémentaires sur les logements collectifs/ Pourcentage de réduction de la taille des logements	1.5 / 4 / 5%	2.45 / 3 / 15%	2 / 3 / 10%	-19.70%

