



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité



HORIZONS

TRANSITION(S) 2050

CHOISIR MAINTENANT
AGIR POUR LE CLIMAT

Feuilleton

Sols

Quels enjeux pour une gestion durable
des sols à l'horizon 2050 ?



Ce document est édité par l'ADEME

ADEME

20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

Retrouvez les scénarios ADEME en ligne sur www.transitions2050.ademe.fr

Crédits photo: Shutterstock

Conception éditoriale et graphique: bearideas

Rédaction: Antoine Pierart

Brochure réf. 011800

ISBN: 979-10-297-1959-2

Dépôt légal: © ADEME Éditions, mars 2022

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L. 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L. 122-10 à L. 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Rappel des conclusions des premiers travaux

Ce feuilletton s'inscrit dans le travail de prospective énergie ressources « **Transition(s) 2050. Choisir maintenant. Agir pour le climat** » présenté le 30 novembre 2021 qui comprend les travaux initiaux et 14 feuillets dont la publication s'étend de janvier à mai 2022. L'ensemble des documents publiés est disponible sur www.transitions2050.ademe.fr.

Pour rappel, « Transition(s) 2050 » est un travail prospectif qui dessine quatre chemins « types » cohérents et contrastés pour conduire la France vers la neutralité carbone tout en intégrant une large palette d'enjeux environnementaux, tels que les différents usages de la biomasse, l'eau d'irrigation, la qualité de l'air, la gestion des déchets, la quantité de matériaux pour la rénovation ou construction, souvent peu représentés dans les travaux prospectifs. Ces scénarios ont pour ambition d'éclairer les débats pour accélérer les prises de décisions, en particulier celles sur la prochaine Stratégie Française Énergie-Climat.

Les quatre scénarios aboutissent tous à la neutralité carbone mais avec des voies différentes. Avant tout, ils ont pour objectif de faire prendre conscience à

tout un chacun, quel que soit son niveau de responsabilité et d'implication dans la construction de ce cheminement, de la nature des transformations et des choix à faire.

Ils sont le résultat de plus de 2 ans de travaux mobilisant plus d'une centaine d'experts de l'ADEME ainsi que des partenaires extérieurs de différents milieux professionnels et académiques, mais également un comité scientifique, constitué de membres du conseil scientifique de l'Agence et complété de personnalités qualifiées.

Pour chaque scénario, l'ADEME a construit un récit cohérent, décliné dans chaque secteur technique, économique et social, au travers de variables structurantes. La description des scénarios couvre les secteurs du bâtiment, de la mobilité des voyageurs et du transport de marchandises, de l'alimentation, de l'agriculture, des forêts, de l'industrie, des déchets et des services énergétiques (fossiles, biocarburants, gaz, hydrogène, chaleur/froid et électricité). Les quatre scénarios et les mots clefs qui les caractérisent sont les suivants :

 S1 GÉNÉRATION FRUGALE	 S2 COOPÉRATIONS TERRITORIALES	 S3 TECHNOLOGIES VERTES	 S4 PARI RÉPARATEUR
<ul style="list-style-type: none"> • Frugalité contrainte • Villes moyennes et zones rurales • Low-tech • Rénovation massive • Nouveaux indicateurs de prospérité • Localisme • Moins de viande 	<ul style="list-style-type: none"> • Modes de vie soutenables • Économie du partage • Gouvernance ouverte • Mobilité maîtrisée • Fiscalité environnementale • Coopérations entre territoires • Réindustrialisation ciblée 	<ul style="list-style-type: none"> • Technologies de décarbonation • Biomasse exploitée • Hydrogène • Consumérisme vert • Régulation minimale • Métropoles • Déconstruction/reconstruction 	<ul style="list-style-type: none"> • Consommation de masse • Étalement urbain • Technologies incertaines • Économie mondialisée • Intelligence artificielle • Captage du CO₂ dans l'air • Agriculture intensive

Par ailleurs, au-delà de neuf enseignements clés, **ce travail a fait émerger cinq problématiques à mettre en débat** :

- La sobriété : jusqu'où ?
- Peut-on s'appuyer uniquement sur les puits naturels de carbone pour atteindre la neutralité ?
- Qu'est-ce qu'un régime alimentaire durable ?
- Artificialisation, précarité, rénovation : une autre économie du bâtiment est-elle possible ?
- Vers un nouveau modèle industriel : la sobriété est-elle dommageable pour l'industrie française ?

RÉSUMÉ EXÉCUTIF

HORIZONS

Feuilleton Sols

des scénarios de Transition(s) 2050

Quels enjeux pour une gestion durable
des sols à l'horizon 2050 ?

CONTEXTE ET OBJECTIFS

L'exercice de prospective Transition(s) 2050 aborde de nombreux secteurs : modes de consommations (aménagement du territoire, construction et rénovation de bâtiments, transports, alimentation, biomasses, déchets...) ; systèmes productifs (agriculture, production forestière et industrie), offre énergétique (gaz, froid et chaleur, biomasse énergie, carburants liquides et hydrogène) et puits de carbone. Ils génèrent une multitude d'impacts plus ou moins importants sur les milieux et notamment sur la ressource sol. Les sols font partie des grands enjeux planétaires. Ressource limitée à l'échelle planétaire et non renouvelable à l'échelle d'une vie humaine, les sols sont indispensables au maintien des activités humaines, à la sécurité alimentaire, à l'atteinte de la neutralité carbone, à la santé des populations, à la préservation de la biodiversité et des écosystèmes. Évaluer l'impact de l'ensemble de ces activités sur la ressource sol (en termes d'empreinte, de changement d'usage et de qualité) est complexe et les impacts des activités humaines sur les sols vont bien souvent au-delà du compartiment sol lui-même et s'étendent très souvent aux écosystèmes associés (faune, flore). Alors que la loi Climat et résilience met en avant l'objectif de Zéro artificialisation nette (ZAN) à terme, **ce document vise à qualifier les impacts sur les sols (et notamment sur leur niveau d'artificialisation) des quatre scénarios de neutralité carbone Transition(s) 2050** pour évaluer les compensations nécessaires à l'atteinte de l'objectif ZAN.

LES SOLS : DÉFINITIONS ET CONCEPTS CLÉS

Deux définitions de « sol » sont à distinguer :

- **le sol en tant que surface (vision 2D)**, terme employé pour représenter le foncier et ce que l'on en fait (aménagement du territoire, changement d'affectation des sols...) ;
- **le sol en tant que milieu vivant (vision 3D)**, organisé en couches composées de particules minérales, de matière organique, d'eau et d'air, le sol est l'épiderme de notre planète. Il correspond à la fine couche située à l'interface entre l'atmosphère et la roche. Les sols sont vivants, ils se forment lentement, sous l'action des milliards d'organismes vivants, de l'eau et du climat, à partir de la décomposition des résidus végétaux et de l'altération des roches.

Les sols ont plusieurs **fonctions écologiques** (= interactions entre les composantes physiques, chimiques et biologiques du milieu), qui contribuent au fonctionnement des écosystèmes. Les **services (dits écosystémiques)** correspondent aux biens et services que les sociétés humaines peuvent tirer des écosystèmes, directement ou indirectement, pour répondre à leurs besoins (nourriture, qualité de l'eau, paysages, etc.). Ils reposent sur les fonctions écologiques des sols et dépendent du contexte et de l'usage de la ressource sol. Services et fonctions sont intimement liés.

QUELLES MENACES PÈSENT SUR LES SOLS ?

Les sols sont encore largement méconnus, pourtant ils sont partout dans notre quotidien, mais leur présence est généralement masquée (par les infrastructures, les habitations, la végétation...). L'impact d'une modification de leur qualité n'est pas directement perçue, contrairement aux impacts sur l'air ou l'eau. L'une des richesses de la France réside dans la diversité des types de sols présents sur le territoire. Les pressions exercées sur ces milieux ont considérablement augmenté au cours des cinquante dernières années du fait de fortes concurrences d'usages, de certaines pratiques agricoles ou sylvicoles et aussi de l'impact du changement climatique. Les principales menaces qui pèsent sur les sols sont les suivantes :

- artificialisation (habitat, infrastructures de transport, énergie...);
- systèmes productifs (agricoles, forestiers...);
- concurrences d'usage et changement d'affectation des sols;
- changement climatique;
- industrialisation;
- pollutions (anthropiques et naturelles);
- acidification;
- eutrophisation.

L'**artificialisation** des sols est une menace majeure, autant en France qu'à l'international : elle consiste à transformer un sol naturel, agricole ou forestier, par des opérations d'aménagement pouvant entraîner une **imperméabilisation** partielle ou totale (recouvrement permanent du sol par un matériau imperméable tel que l'asphalte ou le béton...), afin de les affecter notamment à des fonctions urbaines ou de transport (habitat, activités industrielles et commerciales, infrastructures, équipements publics, tourisme, activités de sports et de loisir, production d'énergie renouvelable...).

Au niveau mondial ces dernières années, l'augmentation de la demande en matières premières issues du vivant génère des tensions sur la ressource sol (et les écosystèmes naturels) au niveau mondial. Ces **changements d'usage des sols** entraînent une transformation profonde des milieux, avec dans certaines régions du monde une diminution considérable de leurs stocks de carbone, de la biodiversité et de leur capacité à stocker et filtrer l'eau. Pour atteindre la neutralité carbone, à l'échelle d'un territoire comme la France, un équilibre doit être trouvé entre les services afin de coupler stockage de carbone, productions durables de biomasses et gestion durable des sols.

La mondialisation des échanges commerciaux génère un usage des terres et des impacts associés, à l'international, sachant que les surfaces impactées sont non négligeables. L'**empreinte sol** correspond à l'ensemble des surfaces (domestiques ou internationales) mobilisées directement ou

indirectement pour satisfaire une consommation donnée. Les sols sont aussi indicateurs des capacités d'adaptation : face aux impacts du changement climatique, les sols et la végétation offrent des fonctions régulatrices (climat, cycle de l'eau, biodiversité...) essentielles pour l'atteinte des objectifs de neutralité carbone. Mais le changement climatique lui-même a des impacts sur les sols, principalement négatifs (engorgement, érosion, déstockage de carbone...). Ainsi, le climat changeant implique que les solutions d'aujourd'hui ne seront pas nécessairement valables demain.

ÉTAT DES LIEUX

USAGE ET QUALITÉ DES SOLS

Au cours de ces quatre dernières décennies, les sols artificialisés ont augmenté de 72 %¹ sur le territoire métropolitain. À l'inverse, les sols agricoles ont reculé de 7,7 %, principalement au profit de sols « naturels » (déprise agricole). Les données disponibles sur la qualité des sols² confirment d'ores et déjà que les sols français n'échappent pas aux multiples dégradations précédemment décrites.

ARTIFICIALISATION DES SOLS

Les principaux facteurs participant à l'artificialisation des sols sont actuellement : l'habitat (42 % des espaces artificialisés selon l'enquête Teruti-Lucas, 2014), les infrastructures de transport (28 %), et les activités industrielles et tertiaires (18%). Le développement de certaines énergies renouvelables, contribuant peu à l'artificialisation dans les observations passées, est également considéré dans ce rapport. Ramenée à la population, la France est 15 % plus artificialisée que l'Allemagne et 57 % plus artificialisée que le Royaume-Uni ou l'Espagne. L'artificialisation augmente presque quatre fois plus vite que la population en France.

EMPREINTE SOL DE LA CONSOMMATION

Concernant les données d'empreinte actuelles, les importations françaises actuelles de denrées agricoles et alimentaires mobilisent 12 Mha à l'étranger (soit près du quart de la superficie de la France), principalement liées à l'importation de viande (4,8 Mha). Pour le reste des biens de consommation impactant l'empreinte sol des Français, outre les volumes de sols érodés et de terres excavées, l'empreinte sol de la France (qui ne correspond pas nécessairement à des sols artificialisés) est estimée entre 77 Mha et 160 Mha. Les surfaces de sols nécessaires (par habitant) à la demande finale de la France sont près de deux fois supérieures à la moyenne mondiale.

¹ D'après l'enquête Teruti-Lucas.

² Issues entre autres des données RMQS, dont les premières analyses remontent aux années 2000.

IMPACTS DES SCÉNARIOS PROSPECTIFS SUR LES SOLS

PRODUCTIONS AGRICOLES

Les hypothèses principales ayant un impact sur l'usage et la qualité des sols sont : le niveau d'intensité des systèmes agricoles, le développement des pratiques agroécologiques, la reterritorialisation des productions, la quantité de bétail et les pratiques d'élevage associées. L'impact sur la qualité des sols n'a pas été quantifié. L'empreinte sol des produits agricoles et alimentaires a été évaluée dans le projet SISAE. Les facteurs principaux impactant les sols sont les pratiques agricoles conventionnelles (tous scénarios), et le développement des surfaces forestières (S1/S2). D'importants changements d'affectation des sols ont lieu dans tous les scénarios et entraînent de fait une réduction potentielle du stock de carbone et du puit associé (principalement dans les scénarios S3, S4 et le scénario tendanciel). Les risques érosifs et d'inondations s'accroissent potentiellement du fait d'une réduction de la capacité de tampon des sols artificialisés (TEND/S3/S4). Plus les modèles agricoles conventionnels sont représentés sur le territoire (TEND/S3/S4), plus ils impactent les sols : pollution des sols et écosystèmes associés aux métaux lourds et pesticides, excédents d'azote, réduction du taux de matière organique et baisse de la fertilité, tassement... Les leviers agroécologiques et les bénéfiques associés en termes de qualité des sols (réservoir de biodiversité, amélioration de la fertilité par retour au sol des résidus et plus fréquente couverture des sols, capacité de filtration et rétention des eaux...) sont davantage présents dans S1/S2. En termes d'empreinte sol associée aux importations, S1/S2 sont les moins impactants. Les déterminants principaux des surfaces mobilisées pour les importations agricoles sont le « panier » de produits importés, particulièrement lié aux évolutions des régimes alimentaires moyens et les coefficients unitaires par unité de tonne importée, impactés d'un côté par l'évolution des pratiques agricoles et de l'autre par les taux d'importations d'origine européenne.

PRODUCTIONS FORESTIÈRES

Les scénarios de production forestière sont décrits dans Transition(s) 2050. Ils ont exploré différentes stratégies de gestion forestière contrastées en changeant notamment le taux de prélèvements de bois et la surface des forêts. Le développement important des forêts modifiera progressivement localement les caractéristiques biologiques et chimiques des sols. En fonction du type d'exploitation forestière et de l'évolution de la mécanisation, de potentiels impacts sur le tassement sont à craindre (S3/S4 en particulier). Le choix de récolter partiellement les menus bois dans S3 et S4 entraînera des risques de baisse de la fertilité et des impacts sur le stockage de carbone. De même, la demande accrue en biomasse forestière entraînera dans certains scénarios (S3 et S4 en particulier) des récoltes mécanisées en zones de forte pente aggravant les risques d'érosion des sols. Quel que soit le scénario, les impacts effectifs dépendront

de la mise en œuvre des chantiers sylvicoles et du respect des recommandations pour maintenir la fertilité des sols, limiter les risques de tassement et d'érosion des sols et de déstockage de carbone, préserver les habitats, les zones humides et les cours d'eau. Ces impacts nécessiteraient des évaluations plus fines, scénario par scénario.

ÉNERGIES RENOUVELABLES (EnR)

Une méthodologie encore exploratoire a été élaborée. Elle estime l'impact du développement des EnR sur l'artificialisation et la qualité des sols dans les scénarios sur le territoire métropolitain. Sont considérées l'emprise totale ainsi que deux dimensions de l'artificialisation : (1) l'usage des terres, (compatibilité de l'installation avec un usage de l'espace comme espace naturel, agricole ou forestier – ENAF); (2) la qualité des sols (niveau de dégradation des sols). Tous les scénarios se traduisent par un impact fortement accru des EnR sur l'usage des sols en France, avec plusieurs Mha concernés. Néanmoins, la majorité de ces surfaces est compatible avec l'agriculture en co-usage. L'articulation, et quelques fois la synergie, avec les activités agricoles paraît un enjeu clé, d'autant plus si l'utilisation d'espaces naturels est évitée pour limiter les incidences sur la biodiversité et les besoins de surfaces de compensation. Les surfaces de cultures dédiées à l'énergie sont également significatives quels que soient les scénarios et représentent 4 à 8 % de la surface agricole utile. Les incidences sur la dégradation des sols sont difficiles à évaluer. Elles peuvent potentiellement concerner des surfaces importantes mais elles dépendront fortement des pratiques mises en œuvre, en particulier pour la production et la récolte de biomasse pour l'énergie. L'imperméabilisation des sols (dégradation considérée comme la plus dommageable) apparaît faible dans tous les scénarios au regard des dynamiques liées à d'autres secteurs d'activité (bâtiment, transport). Les principales énergies concernées sont l'éolien, le photovoltaïque au sol et la biomasse-énergie, avec des problématiques qui diffèrent selon les énergies.

BÂTIMENT

L'analyse repose sur une approche en deux étapes réalisée en partenariat avec le CGDD³ : (1) projeter le besoin en construction des espaces bâtis résidentiels, tertiaires, industriels et agricoles (en surface de plancher) au niveau national ; (2) évaluer l'artificialisation correspondante. L'impact principal est lié aux constructions neuves de bâtiments (dynamique, densité du bâti). En termes de dynamique, tous les scénarios, y compris TEND et S4, s'orientent à la baisse (en raison notamment du ralentissement de la dynamique démographique et de la stabilisation de la décohabitation liée à la baisse des

³ Le Commissariat Général au Développement Durable (CGDD) est une direction du ministère de la Transition écologique.

naissances et à la divortialité...). S1 est le moins artificialisant, S4 le plus artificialisant. C'est donc dans ce dernier scénario que la surface à désartificialiser pour restaurer des fonctions écologiques (principe souvent résumé par le verbe « renaturer ») serait la plus importante pour atteindre l'objectif de Zéro artificialisation nette. S1 arrive à des résultats similaires au scénario ZAN publié par le CGDD, mais via un chemin différent (il inclut ici une réduction drastique de la construction). L'impact sur la qualité des sols n'a pas été quantifié.

TRANSPORT

Quatre types d'infrastructures de transport sont chiffrées : routier motorisé (infrastructures rapides et routes communales), routier cyclable (développement des voies interurbaines), ferroviaire (extension de LGV), entrepôts. Deux conclusions majeures émergent : (1) pour tous les scénarios, c'est l'artificialisation liée aux routes communales qui domine largement (max 250 kha) en raison des kilométrages importants construits chaque année, en lien avec l'étalement urbain, puis les entrepôts logistiques (max 100 kha) et les infrastructures cyclables interurbaines (max 40 kha), très loin devant les aéroports, les infrastructures ferroviaires et les autoroutes ; (2) l'artificialisation est croissante depuis S1 vers S4. L'artificialisation liée aux transports augmente ainsi de 7 à 25 % en 2050, par rapport au niveau de 2015. La tendance est similaire pour l'imperméabilisation des sols, qui augmente de 95 à 314 kha de S1 à S4, soit une hausse de 7 à 22 % par rapport à 2015.

BILAN DE L'ARTIFICIALISATION DES DIFFÉRENTS SECTEURS

En compilant les analyses réalisées pour ces différents secteurs, il apparaît que S4 induit en 2050 près de 600 kha de surfaces artificialisées en plus par rapport à S1.

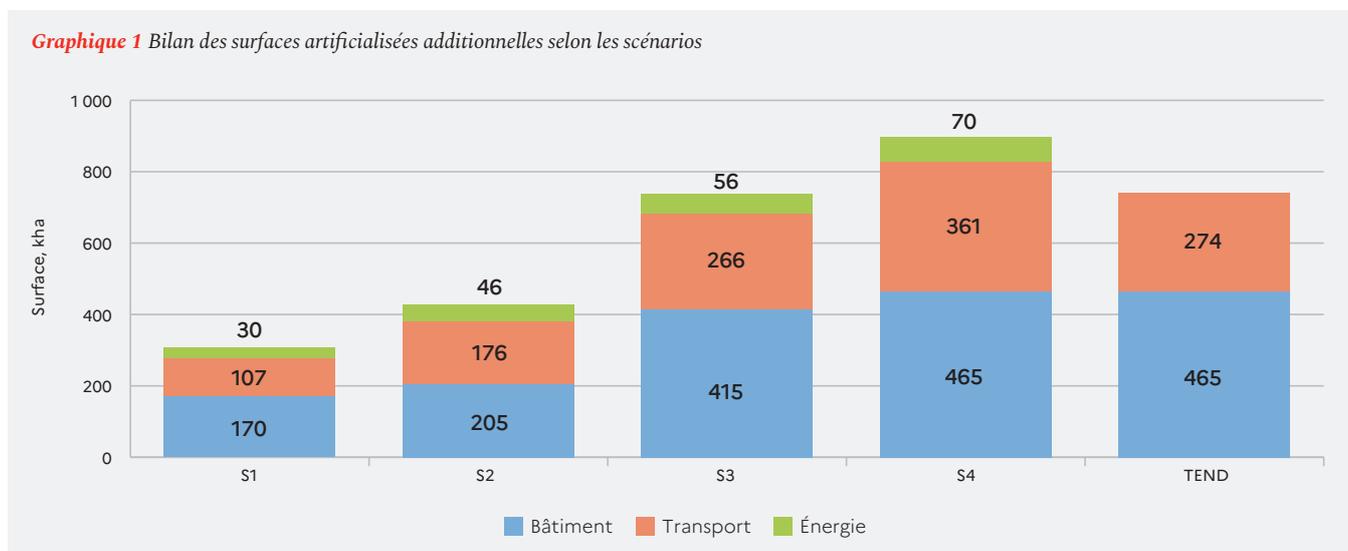
Dans les quatre scénarios, les surfaces additionnelles d'artificialisations sont majoritairement dues aux secteurs du bâtiment (environ 50 %) et des transports (environ 40 %). Le développement des énergies renouvelables représente de l'ordre de 10 % des surfaces additionnelles artificialisées.

Le **Graphique 1** est présenté en milliers d'hectares et correspond aux surfaces **artificialisées additionnelles** par rapport à la situation 2015. Il n'intègre pas les surfaces nécessaires à la production de biomasse énergie.

Après modélisation dans les différents secteurs artificialisants (bâtiment, transport, EnR...), on constate que les besoins en artificialisation des sols sont potentiellement plus importants qu'envisagés au départ par l'ADEME dans la publication Transition(s) 2050⁴. Ces écarts représentent de l'ordre de + 497 kha supplémentaires dans S1, + 124 kha dans S2, - 62 kha dans S3 et environ - 926 kha dans S4. Ces nouveaux résultats ont plusieurs implications :

- l'écart potentiel d'artificialisation nécessaire entre S1 et S4, qui était d'environ 2 Mha sur la base des hypothèses faites dans le cadre de SISAE, serait réduit à 600 kha sur la base de ces hypothèses sectorielles affinées ;
- l'évolution des surfaces artificialisées (à la hausse ou à la baisse selon les scénarios) suggère que le potentiel de biomasse, et/ou de puits de carbone a été surestimé ou sous-estimé respectivement. Malheureusement, la modélisation dans son état actuel ne permet pas de savoir quels types de sols sont impactés (forêts, terres arables, landes...). Si l'on fait l'hypothèse que ces surfaces artificialisées sont principalement prises sur le puits de carbone majoritaire de chaque scénario, on peut estimer que ce puits évoluerait de la façon suivante par rapport aux valeurs estimées dans le rapport Transition(s) 2050 : - 5, - 1, 0 et + 9 MtCO₂eq/an dans S1, S2, S3 et S4 respectivement⁵.

Graphique 1 Bilan des surfaces artificialisées additionnelles selon les scénarios



⁴ Hypothèses issues du projet SISAE.

⁵ Dans S1, S2, S3, l'ordre de grandeur de ces baisses du puits ne remettent pas en cause l'atteinte de la neutralité carbone, étant donnée la marge de sécurité prise dans Transition(s) 2050. Dans S4, cette augmentation potentielle du puits permet d'atteindre un bilan net négatif, du même niveau que dans S3.

Ces comparaisons doivent tout de même être exploitées avec prudence dans la mesure où chaque secteur a utilisé une méthode de calcul propre et des bases de données différentes. Or, des écarts importants existent dans l'estimation des surfaces artificialisées en fonction des méthodes de mesure (*section 3.2*). Dans des travaux ultérieurs, il serait nécessaire de prévoir dès les phases amont une mise en cohérence de ces choix de changement d'affectation des sols (CAS) tant leurs conséquences sur la qualité des sols peuvent être importantes.

Par rapport aux objectifs de la loi Climat et résilience, on constate que seuls S1 et S2 permettent d'atteindre une réduction d'artificialisation sur la période 2022-2031 de plus de 50 % par rapport au rythme de la décennie précédente (*Tableau 1*). Par ailleurs, l'effort de compensation d'artificialisation nécessaire à l'atteinte de l'objectif ZAN en 2050 est très faible pour ces deux scénarios (respectivement 1,4 kha et 3,5 kha), en comparaison de S3 et S4 (compensation de plus de 30 kha dans TEND, 20 kha dans S4).

Tableau 1 Positionnement des scénarios par rapport aux objectifs de lutte contre l'artificialisation de la loi Climat et résilience

	S1	S2	S3	S4	TEND
Réduction d'artificialisation sur la période 2022-2031 par rapport au rythme de la décennie précédente	79 %	68 %	37 %	32 %	15 %
Compensation nécessaire en 2050 pour atteindre l'objectif ZAN (en milliers d'ha)	1,40	3,52	10,71	19,51	30,21

RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES

Au-delà des limites et améliorations possibles de ces travaux, détaillés dans le corps de ce document, l'ADEME propose les recommandations suivantes :

EMPREINTE SOL ET CHANGEMENT D'AFFECTATION DES SOLS (CAS)

Les enjeux sont considérables dans un contexte de changement climatique global où la qualité des sols de France et des sols et écosystèmes naturels internationaux tendent à se dégrader. **Les scénarios alliant davantage sobriété d'usage et réduction du recours à des sols importés permettent potentiellement de réduire ces risques de CAS et limitent le risque de générer de la déforestation importée.** Ils permettent d'augmenter la résilience des écosystèmes et de fait la faisabilité de ces scénarios, tandis que les scénarios proposant peu d'évolution dans les niveaux de consommation tendent à amplifier ces phénomènes de CAS au risque de générer des transferts d'impact dans d'autres régions du monde.

QUELLE ATTEINTE DU ZAN DANS LES SCÉNARIOS ?

Chaque scénario présente des trajectoires et des conséquences sur l'artificialisation des sols, ainsi que la marche à franchir dans la séquence Éviter, Réduire, Compenser (ERC) pour atteindre le ZAN. Ils sont très contrastés. Par exemple, s'agissant du bâtiment et de l'aménagement territorial et urbain, S1/S2 mettent principalement l'accent sur « Éviter », via une limitation de la construction, alors que S3/S4 doivent recourir massivement à la compensation, dans une ampleur inédite. La question de savoir si les surfaces nécessaires à cette compensation (quantité, qualité) sont bien disponibles reste ouverte.

Dans S4 et TEND, par exemple, la compensation nécessaire à l'atteinte du ZAN en 2050 représenterait respectivement une surface équivalente à 2 et 3 fois la surface de Paris ou encore plus d'un terrain de foot dans chaque commune de France (TEND). L'analyse comparée des scénarios met en lumière la nécessité de :

- mieux documenter l'artificialisation et harmoniser les méthodes de mesure ;
- promouvoir les stratégies de coopération entre territoires ;
- ouvrir le dialogue sur la nécessité de construire moins, mieux et plus dense et travailler sur le renouvellement urbain, la densité et la qualité urbaines ;
- mieux documenter et rendre possible la compensation ;
- élargir le concept d'artificialisation aux impacts des pratiques agricoles et sylvicoles.

SOLS ET CHANGEMENT CLIMATIQUE

Il est nécessaire de (i) préserver les stocks de carbone dans les sols riches en matière organique et biomasses associées, en France et à l'étranger et (ii) stocker davantage de carbone dans les sols (et la biomasse) à travers des actions favorisant la qualité des sols et la restauration des écosystèmes dégradés. Cet enjeu doit être couplé plus globalement à la qualité des sols : des sols de bonne qualité sont porteurs de solutions à la fois d'atténuation et d'adaptation. Elle les rend plus résilients face aux conséquences du changement climatique et augmentent leur rôle dans l'atténuation.

Plusieurs questions de recherche ont été identifiées à l'issue de Transition(s) 2050. Par exemple, quelles données et quels modèles seraient nécessaires pour :

- évaluer les impacts des scénarios sur les terres et les sols en France ? à l'étranger ? ;
- intégrer l'évolution des sols sous contrainte climatique dans les scénarios ? ;
- évaluer les vitesses de régénération des caractères dégradés des sols ? ;
- intégrer la temporalité des phénomènes (stockage/déstockage de carbone, etc.) ?

RENFORCER LE SUIVI DE LA QUALITÉ DES SOLS

C'est l'enjeu majeur d'aujourd'hui pour demain dans un contexte de pressions croissantes et de climat changeant. La préservation de la qualité des sols pour leur pleine participation au maintien d'activités humaines durables requiert :

- un renforcement du suivi de leur qualité, *via* un renforcement du Groupement d'intérêt Scientifique sur les Sols (GIS SOL) et de ses actions ainsi que la mise en place d'observatoires régionaux ;
- le déploiement de diagnostics de qualité des sols (et des cartographies associées) ;
- l'évaluation des coûts environnementaux des pratiques dégradant les sols.

D'ici 2030, près de 5 Mha seront libérés par des générations d'agriculteurs proches de la retraite. Les réflexions quant aux usages durables de ces terres devraient être menées dès à présent. L'ensemble des actions précédentes doivent en outre être encadrées et accompagnées par des politiques et mesures ambitieuses, à la hauteur des enjeux qui menacent les sols.

IL Y A URGENGE À PROTÉGER LES SOLS

L'inertie climatique implique que le climat poursuivra son réchauffement (et les conséquences qui en découlent, en particulier en termes de dégradation des sols et des écosystèmes associés) pour au moins les 15 prochaines années et ce quelles que soient les décisions et actions prises aujourd'hui. L'enjeu est colossal et le sujet complexe ; les politiques d'encadrement et d'accompagnement devront être très ambitieuses pour certaines solutions, et elles poseront des questions socio-économiques (désirabilité, faisabilité et conditions de réalisation des mesures, budget public ou coûts privés, etc.). La récente stratégie de l'Union européenne pour la protection des sols à l'horizon 2030 vise à parvenir à des sols en bonne santé d'ici à 2050. Une proposition législative sur la santé des sols devrait en découler.

CONCLUSION

Par les fonctions qui les caractérisent et les services qu'ils rendent à la société, les sols portent notre avenir. Leur gestion durable est au cœur des grands enjeux planétaires et de transition écologique. Mais de nombreuses pressions continuent à les dégrader de façon parfois irréversible. Par exemple, on estime un facteur 3 sur l'artificialisation additionnelle selon les scénarios et les résultats questionnent l'atteinte effective des objectifs de la loi Climat et résilience en matière de lutte contre l'artificialisation dans S3/S4/TEND.

À l'inverse, la sobriété (énergétique, alimentaire...) mise en avant dans S1/S2 s'avère avoir des impacts directs sur la sobriété foncière. Par ailleurs, la part relative des différents secteurs est très différente : bâtiment et mobilité représentent 90 % de l'artificialisation additionnelle et les EnR seulement 10 %. Pour les EnR, une utilisation d'espace importante peut exister, mais elle est en majeure partie compatible avec des usages ENAF. Les sols forment des ressources indispensables pour les transitions sectorielles : les concurrences d'usage évoluent dans le temps, avec la transition et avec l'amplification des conséquences du changement climatique. Les risques associés à l'intensi-

fication des pratiques agricoles et sylvicoles doivent par exemple être limités, en particulier les phénomènes de déforestation et destruction d'espaces naturels à des fins agricoles. Un changement fort de paradigme dans notre relation au monde du vivant est nécessaire pour permettre une transition vers des systèmes plus sobres et résilients, valorisant ces sols et fonctionnant davantage en symbiose avec le vivant (par exemple en valorisant des pratiques agricoles et sylvicoles plus durables et en limitant l'artificialisation).

Au regard des impacts potentiels des différentes trajectoires de sociétés envisagées dans les travaux de Transition(s) 2050, on ne peut que constater qu'agir pour préserver les sols et leurs multiples bénéfices doit alors faire partie des priorités absolues dans les années à venir. L'absence actuelle de réglementation protégeant de façon transversale cette ressource essentielle, à l'instar de l'eau ou de l'air, illustre la complexité des politiques publiques et sectorielles à mettre en place. Compte tenu de l'enjeu que représente la ressource sol sur l'environnement et l'économie, la construction d'une stratégie nationale dédiée aux sols semble indispensable.

Remerciements

ADEME : BARBUSSE Stéphane ; BELLINI Robert ; BERGEY Jean-Louis ; BIGO Aurélien ; BRICHE Élodie ; BUITRAGO Miriam ; CHATEAU Laurent ; DEPARTE Alba ; EGLIN Thomas ; FEIX Isabelle ; GASPARD Albane ; LEFRANC Anne ; MARCHAL

David ; MOUSSET Jérôme ; MULLER Fabienne ; PIERART Antoine ; QUINIOU Valérie ; SANNA Daniela.

Partenaires externes : MOTAMEDI Kiarash, CGDD ; HIDALGO Tomas, CGDD.

SOMMAIRE

Rappel des conclusions
des premiers travaux

3

Résumé exécutif

4

1. Préambule

12

2. Synthèse
de la problématique
et enjeux

13

3. Passé récent et
état actuel en France
métropolitaine

20

4. Méthodologie

23

5. Impacts des scénarios
prospectifs sur les sols

33

6. Limites,
recommandations
et perspectives

45

7. Conclusion

51

8. Références
bibliographiques

52

1. Préambule

Le projet « Transition(s) 2050 » aborde de nombreux secteurs : consommations de ressources (pour l'aménagement du territoire, la construction de bâtiments, les transports, l'alimentation...) ; systèmes productifs (agriculture, production forestière et industrie), offre énergétique (gaz, froid et chaleur, biomasse énergie, carburants liquides et hydrogène), disponibilité et usage des ressources (biomasse et déchets) et puits de carbone. Ces différents secteurs et/ou activités génèrent une multitude d'impacts sur les milieux et notamment sur les sols, objets de ce feuillet, qui font pourtant partie des grands enjeux planétaires et dont dépend la survie de l'Humanité.

L'artificialisation des sols fait partie des enjeux majeurs à adresser dès maintenant du fait de l'ampleur du phénomène et de ses impacts irréversibles sur les sols. En effet, l'artificialisation des sols est, sur une longue période, nettement plus rapide que la croissance de la population et le ralentissement observé ces dernières années semble largement corrélé à la baisse du secteur de la construction. Dans ce contexte, la loi Climat et résilience, publiée au Journal officiel le 24 août 2021, fixe deux objectifs à l'échelle nationale :

- réduire de moitié le rythme de consommation d'Espaces Naturels Agricoles et Forestiers (ENAF) d'ici 10 ans ;
- atteindre le « Zéro artificialisation nette » (ZAN) à 2050.

Deux définitions essentielles y sont inscrites :

- **l'artificialisation des sols** y est définie comme l'altération durable de tout ou partie des fonctions écologiques d'un sol, en particulier de ses fonctions biologiques, hydriques et climatiques, ainsi que de son potentiel agronomique par son occupation ou son usage ;
- **l'artificialisation nette des sols** est définie comme le solde de l'artificialisation et de la renaturation des sols constatées sur un périmètre et sur une période donnés.

Introduite en droit français en 1976, la séquence Éviter, Réduire, Compenser (ERC) vise depuis 2016 (loi pour la reconquête de la biodiversité), une absence de perte nette de biodiversité dans la conception puis la réalisation de plans, de programmes ou de projets d'aménagement du territoire. Elle est l'une des actions phares du plan « Biodiversité. Tous vivants » du ministère de la Transition écologique (MTE) actuellement en révision dans le cadre de la stratégie nationale de la biodiversité. La séquence ERC n'est pas formellement inscrite dans la loi Climat et résilience, néanmoins elle s'avère un principe indispensable pour mettre en place les trajectoires de ZAN à l'horizon 2050.

Les sols sont indispensables au maintien des activités humaines et des écosystèmes, à la sécurité alimentaire, à l'atteinte de la neutralité carbone et à la préservation de la biodiversité. Ils sont également une ressource finie à l'échelle planétaire et non renouvelable à l'échelle d'une vie humaine et font l'objet de nombreuses menaces. Les enjeux qui pèsent sur ces sols sont transversaux et la grande majorité de nos activités les impactent directement ou indirectement (production de biomasses alimentaires et non alimentaires, transport, aménagement du territoire, construction, exploitation minière...). Évaluer l'impact de l'ensemble de ces activités sur la ressource sol (en termes d'empreinte, de changement d'usage et de qualité) est complexe.

Ce rapport tente d'apporter des premiers éléments d'analyse relatifs aux scénarios prospectifs, sans pour autant être exhaustif. Par exemple, l'empreinte sol a principalement été étudiée sur les volets agricoles et alimentaires, moins sur les autres secteurs. De même, les impacts des activités humaines sur les sols vont bien souvent au-delà du compartiment sol lui-même et s'étendent très souvent aux écosystèmes associés (faune, flore). Ces impacts sur les écosystèmes constituent un sujet à part entière qui ne sera abordé que partiellement dans ce feuillet et qui nécessiterait des travaux d'approfondissement spécifiques.

2. Synthèse de la problématique et enjeux

2.1. Les sols : fonctions écologiques, services rendus et enjeux essentiels

Les sols ont plusieurs fonctions écologiques correspondant aux interactions entre les composantes physiques, chimiques et biologiques du milieu. Elles contribuent au fonctionnement des écosystèmes des sols [1] existant indépendamment d'un bénéfice pour l'Humanité [2]. Sept fonctions font généralement consensus :

- habitat pour les organismes du sol et régulation de la biodiversité des écosystèmes terrestres ;
- rétention et fourniture des nutriments pour les organismes du sol et les végétaux ;
- stockage, recyclage et transformation des matières organiques ;
- rétention, circulation et infiltration de l'eau ;
- filtre, tampon et dégradation des polluants ;
- support physique stable pour les végétaux ;
- contrôle de la composition chimique de l'atmosphère et contribution aux processus climatiques.

Les services (dits écosystémiques) correspondent aux biens et services que les sociétés humaines peuvent tirer des écosystèmes, directement ou indirectement, pour assurer leur bien-être. Ces services reposent sur les fonctions écologiques des sols. La notion de services écosystémiques est nettement moins consensuelle au sein de la communauté scientifique que les fonctions dans la mesure où le service est dépendant du contexte, de l'usage et de l'utilité qu'un utilisateur donne à la ressource sol. Sont retenus ici neuf services majeurs rendus par les sols :

- fourniture de biomasse alimentaire et non alimentaire (en termes de quantité et de qualité) ;
- conservation de la biodiversité, fourniture de gènes et organismes d'intérêt pour l'industrie ;
- régulation de la qualité de l'air ;
- régulation de l'érosion et des glissements de terrain ;
- régulation des flux d'eau et de la qualité de l'eau ;
- régulation du climat local et global ;
- régulation des maladies et des ravageurs ;
- régulation et gestion des déchets et effluents ;
- patrimoine, loisirs, culture et éléments des paysages.

Services et fonctions sont intimement liés. Une fonction peut réguler plusieurs services, tout comme un service peut être induit par plusieurs fonctions. Comme rappelé dans Transition(s) 2050, nos sociétés reposent sur une exploitation du vivant et en particulier de la ressource sol à de nombreux niveaux. Les services écosystémiques que fournissent ces sols à nos sociétés sont donc directement liés à leur qualité. Dans une logique de co-bénéfices et réponse aux enjeux majeurs climatiques, sanitaires ou de préservation de la biodiversité, une bioéconomie durable¹ qui préserve les sols et les écosystèmes est nécessaire pour l'atteinte de la neutralité carbone en 2050.

Cela passera par un besoin de surfaces de qualité, autant pour produire des aliments, de la biomasse pour les énergies renouvelables et produits biosourcés, que pour stocker du carbone (dans les sols², dans les arbres qui ont besoin de sols, ou encore dans les matériaux biosourcés). Des sols de bonne qualité sont nécessaires aussi pour l'adaptation des villes au changement climatique (réduction des îlots de chaleur urbaine, limitation des inondations...). Comme le soulignent plusieurs rapports internationaux d'organismes des Nations unies [3] [4] [5] [6], les sols sont au cœur d'enjeux planétaires : sécurité alimentaire (plus de 95 % de notre alimentation dépend des sols), lutte contre le changement climatique, préservation de la biodiversité (plus du quart des espèces de la planète vit dans les sols) et des écosystèmes, fourniture d'eau douce en quantité et de qualité suffisantes, production d'énergie renouvelable. Les concurrences d'usages des sols et leur dégradation, généralisées sur la planète, menace la survie de l'Humanité et des écosystèmes. Il est donc crucial et urgent de les gérer durablement et de préserver leur qualité.

1 ADEME : définition bioéconomie durable (http://multimedia.ademe.fr/infographies/infographie_bioeconomie/#:~:text=La%20bio%C3%A9conomie%20durable%20%C3%A9conomise%20des,par%20les%20m%C3%A9nages%2C%20les%20entreprises%E2%80%A6&text=pour%20d%C3%A9velopper%20la%20bio%C3%A9conomie).

2 Le carbone du sol revêt une importance particulière, car il peut être moins vulnérable aux effets du changement climatique que celui stocké dans la biomasse.

« Qu'est-ce qu'un sol ? »

En fonction des situations, le sol possède plusieurs définitions. Les deux principales à distinguer sont les suivantes :

- **le sol en tant que surface** (vision en deux dimensions), terme employé pour représenter le foncier et ce que l'on en fait (aménagement du territoire, changement d'affectation des sols, occupation et usage des sols) ;
- **le sol en tant que milieu vivant** (vision en trois dimensions) : composé de particules minérales, de matière organique, d'organismes vivants, d'eau et d'air, le sol est l'épiderme de notre planète, il correspond à la fine couche située à l'interface entre l'atmosphère et la roche. Les sols se forment lentement, sous l'action des organismes vivants, de l'eau et du climat, à partir de la décomposition des résidus végétaux et de l'altération des roches. Ils forment un arrangement de couches, pouvant aller de quelques centimètres à quelques mètres. Milieu vivant en constante interaction avec les autres compartiments de l'environnement (eau, air, roches, organismes vivants), le sol est un lieu d'échanges de matières et d'énergie.

« Qualité des sols, de quoi parle-t-on ? »

La littérature actuelle propose une sémantique non stabilisée entre santé et qualité des sols. Dans ce feuilletton, la définition retenue est celle décrite dans l'étude **Diagnostic de la qualité des sols agricoles et forestiers : indicateurs de suivi et stratégies de déploiement** [1] dans laquelle la qualité d'un sol est définie « dans une approche globale visant la préservation de l'ensemble des fonctions du sol et les services induits (...) et sa capacité à maintenir, dans un contexte pédoclimatique et d'usage donné, un fonctionnement normal grâce à une diversité de processus et d'organismes qui réalisent ces processus. Par fonctionnement normal, il est entendu un niveau de fonctionnement suffisant pour maintenir sur le long terme l'ensemble des fonctions du sol ».

2.2. Quelles menaces pèsent sur les sols ?

Les sols sont encore largement méconnus, pourtant ils sont partout dans notre quotidien, mais leur présence est généralement masquée (par les infrastructures, les habitations, la végétation...). Leur opacité et la petitesse de leurs habitants nous empêche de nous rendre compte de l'extrême biodiversité des sols (plus du quart des espèces de la planète vit dans les sols). L'impact d'une modification de leur qualité n'est pas directement perçu, contrairement aux impacts sur l'air ou l'eau. Ainsi, bien que les nombreux services qu'ils rendent à l'Humanité soient indispensables et progressivement reconnus, les connaissances sur les sols ne font pas l'objet d'une appropriation suffisante par la population et les politiques. De fait, une prise de conscience accrue est nécessaire pour l'identification et le déploiement des conditions d'une gestion durable des sols. L'année 2015 a été déclarée « année des sols » par l'ONU, mettant en avant l'importance des services qu'ils rendent, mais aussi et surtout des pressions qui impactent leur qualité de façon parfois irrémédiable.

L'une des difficultés autour de la ressource sol provient du fait que sa sensibilité face aux pressions anthropiques est particulièrement dépendante de ses caractéristiques et des conditions climatiques locales. Or, l'une des richesses de la France réside dans la diversité des types de sol présents sur le territoire... Les pressions exercées sur ces milieux ont considérablement augmenté au cours des cinquante ou cent dernières années du fait de fortes concurrences d'usages, de l'intensification et la spécialisation de l'agriculture [7], de l'intensification des prélèvements de biomasse forestière dans certains massifs et aussi de l'impact du changement climatique. L'augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements climatiques extrêmes est une cause supplémentaire de dégradation des sols. Cette dégradation de la qualité des sols et de leur fonctionnement se traduit d'ores et déjà par des baisses de rendements dans certaines régions du globe, dont la France [8] [9], associées à des pertes de sol, de matières organiques et/ou de biodiversité [3]. Au niveau mondial, près des trois quarts de la surface du sol subissent l'exploitation et/ou l'occupation humaine et un quart est déjà considéré comme dégradé, les causes étant multiples et différentes selon les régions [3] [4].

Quelles données pour mesurer l'artificialisation des sols ?

La base de données CORINE Land Cover dont la résolution actuelle est peu précise (25 ha), ce qui peut être source d'erreurs (ex. : elle capte mal le linéaire étroit et le diffus).

L'enquête Teruti-Lucas, disponible depuis 1981, dont la mesure est imprécise également (estimation des stocks et de l'occupation des sols par croisement d'enquêtes et de données terrain), renseigne bien les tendances et détaille bien les usages agricoles.

Les fichiers fonciers correspondent à des données fiscales, issues de la documentation cadastrale et diffusées par la Direction Générale des Finances Publiques. Source de données annuelle, localisée (à la parcelle) et attributive (usage du sol, nombre et le type de locaux, année de construction...), elle présente plusieurs inconvénients : la différence entre espaces naturels et agricoles est peu fiable, les catégories de sols peuvent varier et surtout elle ne concerne que des données cadastrées, sans traiter le non-cadastré (routes, espaces publics, etc.), ce qui implique que les données de consommation d'espaces sont importantes.

L'OSC-GE (Occupation du sol à grande échelle) se base sur des données acquises à partir de vues aériennes et d'autres bases de données (ex. : Fichiers fonciers), avec un recours à l'intelligence artificielle. Elle est en cours de déploiement en France et permet d'observer l'évolution de l'artificialisation des sols de l'échelle nationale à l'échelle communale.

2.2.1. L'artificialisation des sols

L'artificialisation des sols est une menace majeure, autant en France qu'à l'international : elle consiste à transformer un sol naturel, agricole ou forestier, par des opérations d'aménagement pouvant entraîner une imperméabilisation partielle ou totale, afin de l'affecter notamment à des fonctions urbaines ou de transport (habitat, activités industrielles et commerciales, infrastructures, équipements publics, tourisme, activités de sports et de loisirs, production d'énergie renouvelable...) [4] [10] [11]. Ce sont d'ailleurs souvent les sols de très bonne qualité agronomique qui sont impactés (environ 35% des surfaces agricoles artificialisées entre 2000 et 2006 selon les données CORINE Land Cover [10]). L'artificialisation est expliquée principalement par deux facteurs :

- l'étalement urbain peu dense lié à un mitage des territoires ruraux ;
- la sous-exploitation du parc urbain existant (vacance élevée du bâti pour l'habitat et les commerces, proportion non négligeable de résidences secondaires dans le parc³).

C'est l'imperméabilisation des sols qui affecte le plus les fonctions écologiques des sols et leur capacité à fournir des services écosystémiques. Les conséquences sont nombreuses autant au niveau climatique, écologique que socio-économique : érosion de la biodiversité, baisse du potentiel de

production agricole et de stockage de carbone par perte nette de sols, ou encore augmentation des risques naturels par ruissellement... Par ailleurs, le mitage des espaces, quelle que soit l'échelle, participe à l'éloignement des logements aux services publics et aux bassins d'emploi, entraînant de fait une augmentation des déplacements individuels et infrastructures associées.

En réponse à cet enjeu, la loi Climat et résilience du 24 août 2021 fixe un objectif d'atteinte de Zéro artificialisation nette (ZAN) à l'horizon 2050 [12]. Pour le moment, l'artificialisation est comptabilisée en termes de consommation d'espaces naturels agricoles et forestiers (ENAF) : ce qui n'est pas ENAF est considéré comme artificialisé. Après 2030, d'autres paramètres tels que les atteintes aux fonctions du sol seront prises en considération avec une vision en 3D des sols. Les modalités de mesure et de suivi sont en cours de précision par décret. Dans le cadre de cet objectif national, les territoires doivent s'emparer de cet objectif aux échelles de la planification des territoires (SRADDET, SCoT, PLU, etc.) et doivent baisser de 50 % d'ici la fin de la décennie le rythme de consommation des espaces naturels, agricoles et forestiers par rapport à la décennie précédente. L'objectif ZAN en 2050 renvoie à une notion d'équilibre, à un solde entre surfaces artificialisées et non artificialisées, qui sous-entend que l'artificialisation des sols pourrait se poursuivre avec sobriété et cadrage et devrait

3 <https://www.aua-toulouse.org/wp-content/uploads/2021/04/AUAT-ZAN-decryptage-avril2021.pdf>

s'accompagner d'une compensation, notamment par la renaturation au sens de la restauration de fonctions écologiques, pour limiter les impacts d'une artificialisation des sols qui ne pourrait être évitée. La séquence Éviter, Réduire, Compenser est par conséquent développée dans chacun des scénarios Transition(s) 2050.

2.2.2. L'intensification et la spécialisation de l'agriculture et l'augmentation des prélèvements dans certains massifs forestiers

AGRICULTURE

Le modèle agricole productiviste développé après la Seconde Guerre mondiale a permis d'augmenter les rendements de façon à répondre à la demande alimentaire croissante, mais a profondément modifié l'agriculture française (spécialisation des productions sur le territoire, recours accru aux engrais minéraux, aux produits phytosanitaires et aux labours, monocultures, mécanisation, arrachage des haies...) et a profondément affecté les propriétés physico-chimiques des sols et leur biodiversité. L'ensemble du réseau trophique des sols est réduit et simplifié, rendant les sols moins résistants et moins résilients face aux stress environnementaux et réduisant la capacité des organismes du sol à réguler les ravageurs et les maladies des cultures. Les sols français sont pour la majorité impactés par diverses pollutions liées aux pratiques agricoles passées et actuelles [13].

« Le haut niveau de productivité rendu possible par l'intensification de l'agriculture s'est réalisé au prix d'atteintes à la biodiversité et à la qualité des sols, qui érodent lentement mais sûrement le capital productif agricole, compromettant par là-même notre capacité future à produire. » [14]

L'usage de produits phytosanitaires pour lutter contre les adventices, les maladies et les parasites des cultures impacte la biodiversité des sols et de fait, les fonctions qu'elle assure. Les écosystèmes environnants sont aussi touchés (transfert vers les eaux et la chaîne alimentaire). C'est par exemple le cas des vignobles français où l'on observe une contamination généralisée au cuivre du fait de traitements répétés à base de bouillie bordelaise ou encore des sols antillais ou du nord de la France, largement contaminés aux pesticides organochlorés (respectivement chlordécone et lindane).

L'apport d'engrais et d'amendements, qu'ils soient organiques ou de synthèse contamine aussi les sols agricoles : le cadmium se retrouve souvent en

trace dans les gisements de phosphore et servant d'engrais minéraux (54 tCd/an entrent en moyenne sur les sols agricoles français) et le cuivre retourne au sol par l'épandage de lisiers de porc contaminés du fait de rations non ajustées. De même, le plomb, l'arsenic ou encore le nickel s'accumulent aussi dans les sols par retour au sol des déjections animales [15]. L'irrigation importante dans certaines régions françaises avec des eaux naturellement riches en sélénium et en arsenic peut également être source de contamination. Les substances polluantes ont une rémanence variable, certaines se dégradent dans le temps alors que d'autres, comme les éléments traces métalliques ou certains composés organiques (ex. : pesticides organochlorés), sont persistants. Ils restent donc dans le sol et impactent la biodiversité locale ou sont entraînés avec l'eau vers les nappes phréatiques ou les rivières ou sont transférés le long des chaînes trophiques. Par ailleurs, ces molécules, très stables, sont aussi à l'origine de métabolites secondaires (issus de leur dégradation), qui peuvent s'avérer plus toxiques et aussi stables que la molécule mère. Au-delà des effets susmentionnés de ces contaminants, ils peuvent aussi devenir un handicap majeur en cas de changement d'usage des sols (phytotoxicité pour de nouvelles cultures ou zootoxicité pour des animaux d'élevage sensibles). La contamination des sols par les éléments traces métalliques peut également favoriser l'antibiorésistance dans les sols. Enfin, certains amendements organiques (ex. : composts d'ordures ménagères non ou mal triés) et l'utilisation de plastique pour le paillage ont pu apporter ou apportent encore des plastiques qui se retrouvent à l'état de micro- et nano-plastiques dans les sols, avec des impacts négatifs sur la faune du sol et d'autres matières fertilisantes (boues d'épuration des eaux usées urbaines et effluents d'élevage) apportent des résidus médicamenteux dans les sols. L'exposition de la population française à certains polluants qui ont pour origine les sols (via l'alimentation), globalement (ex. : cadmium) ou dans certaines zones, est parfois importante et pose des questions de santé publique, comme le soulignent plusieurs rapports de l'ANSES [16].

L'érosion des sols est un enjeu majeur, en particulier en contexte agricole. On estime qu'en zone tempérée atlantique on a une perte nette de sols puisque la vitesse de formation des sols est de 0,02 à 0,1 mm/an, alors que celle de l'érosion atteint en moyenne 1 mm/an [17]. En France, l'érosion hydrique des sols est estimée à 1,5 t.ha⁻¹.an⁻¹ (1,2 t.ha⁻¹.an⁻¹ à l'échelle européenne), avec une forte hétérogénéité spatiale [18]. Le manque de couverture des sols dans certains systèmes productifs, ainsi que l'arrachage historique des haies ou l'absence de bandes enherbées favorisent l'érosion, qu'elle soit hydrique ou éolienne (cette dernière étant peu fréquente en France). En cas de tempêtes ou de

fortes pluies, ce sont plusieurs dizaines de tonnes de sol par hectare et par an qui peuvent disparaître et être entraînées vers les cours d'eau qu'ils rendent boueux...

Les impacts du labour sur les organismes du sol sont directs (ex. : les outils blessent et tuent les vers de terre vivant à la surface du sol et les exposent aux prédateurs) ou indirects (la présence de résidus végétaux en surface, leur caractère protecteur du microclimat et la concentration de la matière organique dans les premiers centimètres du sol dans le cas du non-labour est favorable à la microflore fongique et la faune vivant en surface, tandis que l'incorporation de la matière organique en profondeur, dans le cas du labour, peut favoriser la faune du sol vivant plus profondément et l'activité bactérienne). De manière globale, l'agriculture de conservation qui allie non-labour ou travail simplifié et présence d'un couvert végétal est favorable à la qualité écologique des sols comparativement à l'agriculture conventionnelle [19].

Une proportion importante des sols français présente des teneurs en phosphore relativement faibles. La fertilité de ces sols agricoles est en jeu à moyen terme en cas de diminution des apports d'engrais phosphatés minéraux. À l'opposé, les risques d'eutrophisation des milieux sont importants en situation d'apports non raisonnés de fertilisants phosphatés. Ces deux situations antagonistes soulèvent la question d'une meilleure valorisation et répartition des élevages et de leurs effluents pour corriger les unes et les autres. La fertilisation minérale, notamment en azote et phosphore, surtout si elle est accompagnée d'une exportation des résidus de culture, a généralement un impact négatif sur les communautés microbiennes et la faune du sol, d'abord parce que les matières organiques constituant la principale ressource énergétique et nutritive pour les organismes du sol, le remplacement de la fertilisation organique (ex. : fumiers) par une fertilisation minérale va les priver de matière organique. Ensuite parce que l'apport excessif d'azote et de phosphore provoque des déséquilibres énergétiques et nutritionnels pour les organismes du sol et les réseaux trophiques, avec pour effet, une diminution de la biodiversité du sol. Les apports de matières organiques améliorent la stabilité des agrégats de sol et donc la portance et la résistance au tassement et à l'érosion. D'autres pratiques agricoles, liées généralement à l'agriculture conventionnelle, sont défavorables à la biodiversité des sols : absence de couvert végétal à certaines périodes de l'année et monocultures. À l'inverse, les pratiques recommandées en agriculture de conservation ou en agriculture biologique sont favorables : rotations culturales longues et diversifiées, introduction de prairies et de légumineuses dans les rotations, présence d'infrastructures agroécologiques (ex. : bandes

enherbées), semis sous couvert vivant, couverture végétale permanente.

Enfin, le passage d'engins de plus en plus lourds et l'augmentation de la charge animale provoquent un tassement important, aggravé par la faible qualité structurale des sols liée, entre autres, à un trop faible taux de matière organique et à l'absence de couverts végétaux. La capacité de ces sols à infiltrer l'eau diminue, tout comme leur biodiversité, ce qui intensifie à terme les risques érosifs, mais aussi une baisse de production, une augmentation du risque de lessivage des nitrates et d'émission d'oxyde nitreux. Le tassement est un processus majeur de dégradation physique des sols touchant approximativement 33 Mha en Europe.

PRODUCTIONS FORESTIÈRES

Les forêts représentent un stock et un puits de carbone majeur (voir les chapitres production forestière et puits de carbone de Transition(s) 2050). Les sols forestiers sont en général assez pauvres en éléments nutritifs, mais leur recyclage s'y opère efficacement. La quasi-totalité des forêts françaises ne reçoit ni engrais ni amendements minéraux ou organiques. Les feuillages, les branches et racines de petit diamètre sont les parties de l'arbre dont le taux en nutriments est le plus élevé. Mais les pratiques sylvicoles et l'intensification des prélèvements liés à l'augmentation des usages du bois peuvent générer des impacts sur la qualité des sols. Il s'agit d'un enjeu majeur qui risque de s'intensifier.

L'intensification de certaines pratiques sylvicoles à destination du bois énergie peuvent amener à rompre les cycles géochimiques, *via* le prélèvement de ces compartiments jusqu'alors laissés en forêt (rémanents, menus-bois, souches...) entraînant une baisse de la fertilité des sols. La mécanisation de l'exploitation forestière accentue ce phénomène et engendre également un risque de tassement plus ou moins intense des sols impactant aussi l'aération et l'activité biologiques des sols en plus de l'enracinement des arbres (baisse de leur résilience face au changement climatique). L'impact des pratiques sylvicoles sur les stocks de carbone est variable [20] : à l'étape du reboisement, la préparation du sol peut fortement diminuer les stocks de carbone dans les sols, à court et à long terme (travaux de labour sur sol nu, récolte d'arbres entiers dont menus-bois...).

L'impact de la récolte des souches sur les stocks de carbone des sols est encore mal connu en forêts tempérées. La riche biodiversité des sols forestiers, qui contribue au bon fonctionnement du sol et à la productivité du peuplement, *via* le recyclage

des matières organiques et des nutriments, est directement impactée par les pratiques sylvicoles intensives ci-dessus ainsi que par la fragmentation des massifs et l'introduction d'essences exotiques. Le risque érosif est naturellement présent en forêt sous certaines conditions (pente et densité/diversité de la couverture forestière). Un quart des forêts, situées sur des pentes supérieures à 25 %, y est sensible. Des coupes de bois mettant le sol à nu ou un peuplement composé d'une seule strate de végétation augmentent la sensibilité au risque érosif. Les coupes rases et l'exportation des menus bois ou souches l'amplifient. Enfin l'augmentation de la récolte de bois et le développement de la mécanisation peuvent entraîner des besoins supplémentaires de desserte forestière (piste forestières, emplacements pour les dépôts...) et des cloisonnements d'exploitation, générant potentiellement tassement et impacts sur la biodiversité.

2.2.3. Les autres activités humaines, sources de pollution des sols

Les sols ont été (et sont) exposés aux pollutions dues aux activités humaines (en grande majorité). D'autres activités que l'agriculture sont sources de pollution : activités minières, industrielles, de gestion des déchets, de production ou de distribution d'énergies conventionnelles, chauffage, transports, etc. Émis dans l'air et transportés sur de plus ou moins longues distances avant d'être redéposés sur les sols, émis directement dans les sols en raison d'accidents ou de fuites liées à une mauvaise gestion des effluents et déchets, émis dans les eaux superficielles et réintroduits dans les sols via le dépôt de sédiments pollués lors des crues ou d'opérations de curage... les voies de pollution des sols sont diverses. Les polluants se diffusent ensuite dans les sols, dans les eaux souterraines et superficielles et sont absorbés par les végétaux et les animaux. Ils peuvent aussi être réémis dans l'air sous forme de poussières notamment, qui peuvent être respirées ou vont se redéposer plus loin.

Cette contamination menace la qualité de la ressource en eau, de la chaîne alimentaire et des écosystèmes. Elle peut être diffuse et concerner de larges parts du territoire ou importante et localisée (on parle alors de sites pollués). Les polluants rencontrés sur les anciens sites industriels sont très variés, d'origine organique (hydrocarbures, solvants...), minérale ou métallique (plomb, mercure...) [21]. Autre source d'inquiétude : « les polluants émergents » présents dans les sols sous forme de débris ou d'éléments chimiques. Il s'agit notamment de certains éléments traces métalliques (utilisés de manière intensive récemment), de composés pharmaceutiques, de perturbateurs endocriniens, d'hormones, de polluants biologiques, de nanomatériaux et de

microplastiques, dont certains sont désormais utilisés dans presque tous les secteurs industriels. Les pollutions diffuses posent de nombreuses questions (réversibilité de la dégradation, effets cocktails de divers polluants en petites doses sur les écosystèmes et sur l'être humain à long terme, coûts de réparation des dommages, etc.). Les anciens sites industriels, miniers ou d'autres activités économiques, publiques ou de services (stations-services, sites ferroviaires ou militaires, zones commerciales, etc.), parfois en friche, sont présents sur tout le territoire, en en cœur de ville ou en périphérie, parfois rattrapés par l'extension urbaine. Leur reconquête constitue donc un enjeu majeur de la réduction de l'artificialisation par les opportunités foncières qu'ils représentent. Dans cette perspective, l'intégration de la problématique de pollution dans la conception de projet de recyclage du foncier dégradé est essentielle [22].

2.2.4. Concurrence d'usage sur les sols : des équilibres délicats

Pour rappel, il est nécessaire de distinguer la notion d'occupation du sol, qui décrit le couvert biophysique présent à la surface du sol (arbres, buisson, végétation herbacée, sol nu, bâti, réseau...) de celle d'usage du sol, qui renvoie généralement à la description des espaces selon leur finalité socio-économique (vocation résidentielle, industrielle, commerciale, agricole, forestière, loisir, préservation de la biodiversité, etc.). Pelouse et pâturage sont deux usages d'un même type d'occupation (végétation herbacée). L'accroissement de la population et l'évolution de ses besoins entraînent, dans chaque scénario, des changements d'affectation des sols (CAS) différents. On distingue deux types de CAS : le CAS direct (CASd) lorsque l'on modifie localement la catégorie d'occupation fait d'un sol et le CAS indirect (CASi) qui concerne un changement d'usage des sols sur un autre territoire ou un autre pays via les mécanismes de marché.

Ainsi, un changement d'usage ou d'occupation peut entraîner en cascade des changements d'usage ou d'occupation ailleurs dans le monde (ex. : l'augmentation de surface de cultures énergétiques au détriment des cultures alimentaires en France peut entraîner une déforestation outre-Atlantique afin d'y produire des denrées alimentaires [23]). Tout CAS peut fortement modifier les capacités de puits ou stock de carbone et d'émissions de carbone des sols [3]. L'augmentation quasi exponentielle de la demande en matières premières issues du vivant (production de biomasses alimentaires ou non alimentaires), causée par l'augmentation de la population mondiale et à l'élévation générale du niveau de vie (ex. : régimes alimentaires plus carnés, besoins en énergie plus importants) génère, au

niveau mondial, des tensions fortes sur la ressource sol⁴ et plus largement sur les écosystèmes naturels : les agriculteurs et exploitants forestiers doivent trouver des sols pour produire plus, quitte à convertir des sols initialement non cultivés en sols cultivés ou à intensifier les récoltes de bois dans les forêts. Ces choix locaux ont donc aussi des conséquences indirectes sur des choix à l'international, qui sont toujours difficiles à quantifier, ne pouvant s'analyser que par l'utilisation de modèles complexes. Dès lors, pour atteindre la neutralité carbone, à l'échelle d'un territoire comme la France, un équilibre doit être trouvé entre ces différents usages afin de coupler stockage de carbone, productions durables de biomasses et gestion durable des sols.

2.2.5. Empreinte sol et exportation de nos impacts

La mondialisation des échanges commerciaux génère un usage des sols et des impacts associés, à l'international, sachant que les surfaces impactées sont non négligeables. L'empreinte sol correspond à l'ensemble des surfaces de sol (domestiques ou internationales) mobilisées directement ou indirectement pour satisfaire la consommation d'un territoire donné (ex. : Europe, France ou région) [24]. En effet, l'analyse des impacts des activités humaines sur un territoire donné ne peut se réduire aux émissions et impacts territoriaux, une partie des enjeux (sol, GES, eau, biodiversité...) étant délocalisée au travers des importations. Ainsi, l'empreinte « sols agricoles » pour la consommation de produits biosourcés (alimentaires et non alimentaires) de l'« Europe des 27 » est estimée à 232 Mha (187 Mha domestiques + 45 Mha « importées »), à comparer aux 19 Mha de sols agricoles de l'UE-27 « exportés » [25].

De fait, évaluer l'impact de l'évolution de nos modes de vies (et de consommations) ainsi que des modes et lieux de production associés sur les changements d'affectation et d'usage des sols, nécessite de définir un champ précis des flux pris en compte pour évaluer une empreinte globale associée. Cette mécanique est complexe et les évolutions d'empreintes à l'horizon 2050 sont difficiles à estimer. Ce champ thématique a été peu approfondi dans le cadre du projet Transition(s) 2050 au-delà du secteur agricole/alimentaire et des empreintes matières. Ainsi, les modifications de la demande et des pratiques envisagées dans les scénarios génèrent des pressions très variables sur les sols (en France et ailleurs dans le monde) qu'il serait nécessaire de caractériser.

2.2.6. Conséquences du changement climatique sur les sols : des impacts sur le rôle des sols dans la neutralité carbone

Les sols sont aussi des indicateurs des capacités d'adaptation : face aux impacts du changement climatique, les sols et la végétation apportent des fonctions régulatrices (climat, cycle de l'eau, biodiversité...) qui sont essentielles pour l'atteinte des objectifs de neutralité carbone. Les techniques alternatives introduisent des risques technologiques supplémentaires qui dégradent globalement notre résilience (cf. chapitre 1.3. *Adaptation au changement climatique* du rapport Transition(s) 2050 et ses approfondissements au sein du feuillet dédié).

Le changement climatique lui-même a des impacts sur les sols, principalement négatifs. Selon le rapport du GIEC, il aggrave la dégradation des sols, particulièrement dans les zones côtières de basse altitude, les deltas fluviaux, les zones arides et les zones de pergélisol [3]. En effet, les sols dégradés stockent moins de carbone, voire deviennent déstockants : les pergélisols, dont le dégel a commencé, vont émettre des GES... Pourtant, les sols représentent un stock de carbone majeur (cf. chapitre 2.4.3. *Puits de carbone* du rapport Transition(s) 2050). Une variation même faible de ce stock peut entraîner des émissions importantes à l'échelle globale. De plus, les événements climatiques extrêmes (pluies intenses, sécheresses prolongées) dont l'occurrence augmente avec le changement climatique [3], impactent et impacteront encore davantage la qualité des sols. Les pluies hivernales plus abondantes entraînent un engorgement des sols et en modifient la structure, affectant finalement certaines cultures ou essences forestières sensibles. Les épisodes pluviométriques extrêmes auront, quant à eux, pour conséquence d'accélérer les coulées de boues. À l'inverse, l'intensification et la prolongation des périodes de sécheresse augmenteront le risque d'incendies de forêts et d'espaces naturels et réduiront les apports en matières organiques (réduisant d'autant les stocks de carbone contenus dans ces biomasses et leur capacité de puit associée). Les fissures générées dans les terrains les plus argileux deviendront des voies d'entrée d'eau trop rapides vers les couches profondes au retour des pluies. Le sol ne jouant plus son rôle de filtre, certaines bactéries pourraient atteindre les eaux souterraines. De plus, l'eau ne participerait plus à l'hydratation du sol lui-même et de son écosystème

Ainsi, le climat changeant implique que les solutions d'aujourd'hui ne seront pas nécessairement valables demain.

⁴ La FAO a par exemple estimé qu'il sera nécessaire d'augmenter la production alimentaire mondiale de 70 % d'ici 2050.

3. Passé récent et état actuel en France métropolitaine

3.1. Usage et qualité des sols

Selon l'enquête Teruti-Lucas, l'occupation du sol peut être subdivisée en 15 grandes catégories, qui permettent de retracer l'évolution de l'usage des terres ces 40 dernières années [26]. Au cours de cette période, les sols artificialisés ont augmenté de 72 % sur le territoire métropolitain (avec une accalmie potentielle ces dernières années), à raison d'environ 57,6 kha/an. À l'inverse, les sols agricoles ont reculé de 7,7 %, principalement au profit de sols « naturels » à court terme. Ceci est néanmoins un bilan net, car selon la même enquête, quelques surfaces naturelles sont passées à sols agricoles (ex. : défrichement pour des cultures et élevage).

Les sols évoluent constamment du fait de pressions naturelles et anthropiques (usages, aménagements fonciers, pratiques agricoles et sylvicoles, épandages de boues, retombées atmosphériques, pollutions accidentelles...). Historiquement, la qualité des sols n'a pas été suivie sur le territoire. Pourtant, il est indispensable de détecter de façon précoce, l'apparition et les tendances de ces évolutions, à l'aide de programmes d'observation et de suivi pour assurer un maintien de leur qualité. Ce n'est que récemment, avec la création du Réseau de Mesure de la Qualité des Sols (RMQS) [27] en 2000, qu'une première cartographie de l'état des sols de France a pu être réalisée grâce à un échantillonnage de plus de 2200 sites répartis sur l'ensemble du territoire (Métropole et Outre-mer). Après cette première campagne, un rapport détaillé a été publié par le Groupement d'intérêt Scientifique sur les Sols (GIS SOL) [28]. Les données présentées restent très majoritairement valides et le suivi dans le temps via la seconde campagne de mesure en cours (2016-2027) permettra de voir l'évolution de la qualité des sols. Les données historiques d'évolution des pratiques agricoles, forestières et industrielles, ainsi que les données issues du rapport confirment d'ores et déjà que les sols français n'échappent pas aux multiples dégradations précédemment décrites. Les conclusions de ce rapport sont nuancées quant à l'état des sols du territoire : certaines menaces apparaissent aujourd'hui particulièrement prégnantes ou ont parfois déjà provoqué des dommages quasi irréversibles par le passé (érosion, artificialisation, certaines contaminations...). D'autres font l'objet d'inquiétudes ou d'interrogations quant à leur évolution et leurs impacts possibles dans le futur

(fertilité chimique par exemple). Sans volonté d'exhaustivité, on peut citer par exemple :

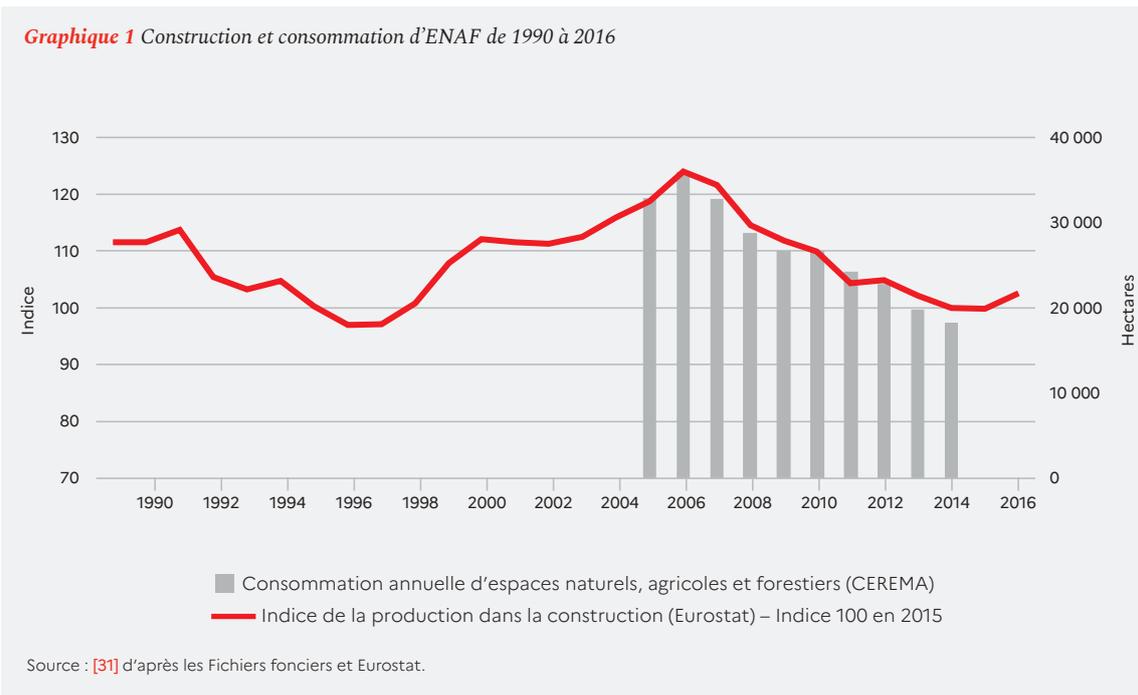
- le passé minier et industriel français ainsi que l'utilisation d'essence plombée qui ont largement contaminé les sols *via* des retombées atmosphériques localisées et diffuses de métaux lourds (entre autres...) venant enrichir les sols qui présentent pour certains une teneur naturelle en éléments traces métalliques, issue de l'altération de la roche mère sous-jacente) ;
- le défrichement pour des usages agricoles (dès le Moyen Âge, puis lors du grand remembrement des années 1960-1980 *via* la destruction du maillage bocager) ont contribué à l'érosion des sols et de la biodiversité. L'érosion hydrique des sols affecte environ 18 % du territoire métropolitain ;
- l'intensification de l'agriculture qui s'est progressivement opérée depuis la Seconde Guerre mondiale pour assurer l'autonomie alimentaire de populations croissantes, a permis d'accroître de façon importante les rendements agricoles et la sécurité alimentaire. Néanmoins, les pratiques agricoles associées ont participé à dégrader la qualité des sols (**section 2.2**) : la forte mécanisation des pratiques, couplée au manque de retour au sol des résidus et au travail du sol, a provoqué tassement et baisse du taux de matière organique et plus largement de la fertilité. L'apport intensif d'intrants chimiques mais aussi dans certaines situations, l'épandage de « gadoues », sorte de compost de déchets urbains contenant par exemple du plastique et des métaux lourds ou d'autres contaminants, ont par ailleurs généré de multiples pollutions des sols et milieux environnants ainsi qu'une érosion de la biodiversité. Par exemple, le phosphore minéral, essentiel à la fertilité des sols, se raréfie à l'échelle mondiale. Il est aussi en diminution dans certains sols français. Ces sols sont donc régulièrement enrichis en phosphore par une fertilisation minérale, mais ils le sont aussi de fait en cadmium, qui n'est pas éliminé dans les filons de phosphore lors de la fabrication des engrais ;
- plusieurs observations montrent déjà que les taux et les stocks de matières organiques dans les sols sont en baisse depuis plusieurs décennies

dans certaines régions françaises, par exemple en Beauce, en Bretagne, en Franche-Comté, dans les Landes et dans le Piémont pyrénéen.

- l'intensification de la sylviculture a entraîné des phénomènes similaires (tassement, perte de biodiversité...);
- l'artificialisation des sols associée à la construction du bâti (habitat, activités économiques, etc.), au développement d'infrastructures de transport mais aussi de parcs, jardins et pelouses impactent considérablement depuis plusieurs décennies les fonctions et services rendus par les sols. Près de 11 ha par heure disparaissent en Europe (et la France est en tête), principalement au détriment des sols agricoles (plus du tiers ayant de très bonnes qualités agronomiques à l'origine...).

3.2. Artificialisation des sols

Selon la source de données d'évaluation de l'artificialisation des sols utilisée, la surface totale artificialisée varie entre 3,5 Mha (Fichiers fonciers) et 5,1 Mha ([29]), soit une incertitude de 1,6 Mha (Tableau 1). Plusieurs facteurs participent à l'artificialisation des sols sur le territoire. Les principaux sont considérés dans ce rapport, à savoir : l'habitat (42 % des espaces artificialisés [29]), les infrastructures de transport (28%, [29]), et les activités industrielles et tertiaire (18 %, [29]). Le développement de certaines énergies renouvelables, contribuant peu à l'artificialisation dans les observations passées, sont également considérées dans ce rapport [30]. Comme l'illustre la figure suivante, on observe une forte corrélation des données de construction avec celles d'artificialisation, au niveau national (corrélation plus valable à un niveau local) [31].



Les surfaces à usage de transport représentaient 1,6 Mha en 2015 (sans compter les télécommunications ni le transport par conduite et électricité), soit 2,9 % de la surface métropolitaine. Ces sur-

faces ont augmenté de 14 % entre 2006 et 2015. Hormis pour le transport fluvial, ces surfaces sont majoritairement artificialisées et occupent 1,4 Mha (**Tableau 1**, [32] et [33]).

Tableau 1 Surfaces à usage de transport en 2015, évolution entre 2006 et 2015 et surfaces artificialisées et imperméabilisées par mode de transport en 2015 (kha)

	Occupation des sols				Artificialisation		Imperméabilisation	
	Surfaces en 2015		Surfaces supp. 2006-2015		Surfaces en 2015		Surfaces en 2015	
Routes et autoroutes	1 279	81 %	151,6	77 %	1 248	87 %	1 127,9	88 %
Chemins de fer	96	6,0 %	11,6	5,9 %	85	5,9 %	74,5	5,8 %
Transports par eau	115	7,3 %	9,8	5,0 %	14	1,0 %	11,7	0,9 %
Transports aériens	28	1,7 %	3,7	1,9 %	27	1,9 %	10,3	0,8 %
Stockage, services auxiliaires	69	4,3 %	19,3	9,8 %	66	4,6 %	53,2	4,2 %
TOTAL transports	1 586		196		1 440		1 278	

Source : [33].

Chiffres clés

- Ramenée à la population, la France est 15 % plus artificialisée que l'Allemagne et 57 % plus artificialisée que le Royaume-Uni ou l'Espagne.
- Entre 20 et 30 kha/an d'ENAF consommés.
- L'artificialisation augmente presque 4 fois plus vite que la population (+ 70 % depuis 1981 contre +19 % sur la même période pour la population).
- Habitat : 50 % du rythme d'artificialisation. Infrastructures : 16 %. Commerces et services marchands : 5 %.

3.3. Empreinte sol de la consommation

Dans Transition(s) 2050, l'empreinte sol a été recalculée pour les denrées agricoles et alimentaires sur la base des simulations réalisées dans le cadre du projet SISAÉ. Concernant les données d'empreinte actuelles, les importations françaises actuelles de denrées agricoles et alimentaires mobilisent 12 millions d'hectares à l'étranger (soit près du quart de la superficie de la France), principalement liées à l'importation de viande (4,8 Mha), de cacao (1,7 Mha), d'huiles (2 Mha), de tourteaux (1,6 Mha), de fruits/légumes (0,7 Mha) et de café (0,6 Mha) [34].

Pour le reste des biens de consommation impactant l'empreinte sol des Français, outre les volumes de sols érodés et de terres excavées, l'empreinte sol de la France (qui ne correspond pas nécessairement à des sols artificialisés) est estimée entre 77 Mha et 160 Mha (soit 1,3 à 2,5 ha/hab) [35]. Les surfaces de sols nécessaires (par habitant) à la demande finale de la France sont près de deux fois supérieures à la moyenne mondiale, mais elles sont dans la moyenne européenne et sont restées stables entre 1997 et 2004. Le taux de dépendance de la France vis-à-vis des terres étrangères (« contenu en sols » des biens importés/demande finale française en sols) s'élève à près de

65 %. Le calcul du bilan des surfaces de sols utilisées pour les productions forestières et agricoles importées et exportées montre que la France « importe » plus de sols qu'elle n'en « exporte », que la part des secteurs « produits animaux » et « produits végétaux » a beaucoup fluctué depuis les années 1960 et qu'aujourd'hui le déplacement net de sols est surtout dû aux produits du bois. Par ailleurs, selon les données recueillies par les douanes françaises, les minerais métalliques et produits dérivés ont vu leurs importations augmenter fortement ces dernières décennies depuis l'arrêt des extractions sur le territoire. En 2018, près de 58 Mt sont importées.

De fait, bien que l'empreinte sol n'ait pas été calculée pour les minerais, force est de constater que la France délocalise à l'étranger les impacts environnementaux induits par ses besoins en minerais métalliques et produits dérivés (excavation de grandes quantités de terre, défrichement des sols et élimination de la végétation, atteinte à l'habitat et à la survie d'espèces endémiques, atteinte au système hydrologique, dégradation des paysages...).

4. Méthodologie

Les hypothèses ayant un impact dominant sur l'usage et la qualité des sols sont rappelées ici.

4.1. Productions agricoles

SYSTÈMES AGRICOLES

Le secteur agricole est en transition forte pour répondre aux besoins exprimés par les secteurs de la demande, qu'elle soit alimentaire ou non alimentaire, tout en s'adaptant à l'évolution du climat et en réduisant sa dépendance aux intrants. Les principes de l'agroécologie sont mis en avant dans l'ensemble des scénarios, mais de façon graduelle (plus poussés dans S1 et S2 avec des systèmes plutôt extensifs, plus axés sur des systèmes intensifs et la technologie dans S3 et S4). Les productions à bas niveaux d'intrants de synthèse sont valorisées sur les premiers scénarios, couplées à une diminution des importations. *A contrario*, S3 et S4 favorisent les systèmes plus intensifs, mais optimisés techniquement pour tenter de réduire leurs impacts.

CHEPTELS ET PRATIQUES D'ÉLEVAGE

La quantité de bétail, leur productivité et les pratiques d'élevage associées évoluent de façon contrastée : avec davantage d'extensivité, certains cheptels sont fortement réduits dans S1 et S2 alors que l'on trouve des systèmes optimisés mais plus proches des tendances actuelles dans S3 et S4. Les terres libérées sont réallouées de façon différente selon les scénarios (forêt dans S1, productions alimentaires dans S2).

PRODUCTION DE BIOMASSES À USAGE NON ALIMENTAIRE

Pour répondre à la demande en bioénergies et contribuer à substituer les ressources fossiles utilisées dans d'autres secteurs, les scénarios S1, S2 et S3 développent la valorisation des effluents d'élevage et des couverts végétaux en méthanisation, du bois bocager en énergie et prévoient la mise en place de cultures énergétiques pérennes en lien avec les espaces libérés par l'évolution de la demande alimentaire.

ADAPTATION DES SYSTÈMES FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Le besoin d'adapter les systèmes productifs est toujours présent car indispensable. Cela passe par davantage de sobriété, couplée à des leviers agronomiques (dont la diversification des productions) et d'une reterritorialisation plus ou moins marquée des productions dans S1 et S2, contre une optimisation technique et technologique des systèmes productifs actuels dans S3 et S4.

Dans Transition(s) 2050, l'impact des systèmes agricoles sur la qualité des sols n'a pas été estimé quantitativement. La majorité des données présentées sont qualitatives, sur la base des hypothèses macro définies dans le chapitre **2.2.1 Production agricole**. L'empreinte sol des produits agricoles et alimentaires a été évaluée dans le cadre du projet SISAE, la méthode est décrite de façon détaillée dans le rapport associé [36]. En résumé, les travaux de Barbier (et al.) [34] ont permis de développer des outils d'évaluation de la consommation alimentaire de la population française métropolitaine sous forme d'empreinte (sol, énergie et GES). Il a permis de faire dialoguer, tout le long de la chaîne alimentaire, les données issues des statistiques et modèles de production agricole (Climagri, MoSUT), de la consommation alimentaire (descriptions d'assiettes sur la base des données INCA 2 et assiettes prospectives simulées), de la transformation et des transports (enquêtes SITRAM et ENT-D). La distribution des zones d'origine des importations issues de la modélisation transport est reprise dans le modèle GlobAgri afin d'évaluer les surfaces mobilisées pour la production des produits importés, les consommations d'énergie, les émissions de GES à la production et liées au changement d'usage des sols. Ces résultats permettent d'évaluer les empreintes de l'étape agricole du système alimentaire.

4.2. Production forestière

Les scénarios de production forestière, établis à partir de l'étude INRAE/IGN [37], ont exploré différentes stratégies de gestion forestière contrastées en changeant notamment le taux de prélèvement de bois⁵. Ainsi, des variations du taux de prélèvement de bois sur l'accroissement biologique des forêts (entre 55 % pour S1 et 82 % pour S4 à l'horizon 2050) conduisent à différents niveaux de disponibilité en bois qui augmentent significativement dans S3 et S4.

L'augmentation des prélèvements de bois en S3 et S4 par rapport à S1 concerne notamment les peuplements plus faiblement exploités aujourd'hui. Le S4 intègre également un plan de reboisement avec des essences productives (notamment exotiques) en remplacement des forêts existantes moins productives (+ 500 kha étalés sur les 10 premières années). La récolte de menus bois n'augmente pas dans S1 et S2, contrairement à S3 et S4 où elle augmente tout en restant limitée à 50 % du volume total de menus bois issue des arbres prélevés (i.e. 50 % est laissé au sol). Aucun des scénarios considère des disponibilités en bois issu de la récolte de souches. S3 et S4 intègrent des prélèvements en zones à plus forte pente (augmentation des prélèvements en zones de montagne), auxquels est associé un risque d'érosion. Par ailleurs, notre analyse ne nous permet pas d'évaluer la surface en régénération naturelle par rapport à la plantation entre S1, S2 et S3. Le S4 intègre plus de surface (500 kha) en plantation en plein avec la transformation des peuplements (essences exotiques). Dans l'ensemble des scénarios, il y a une augmentation du bois mort

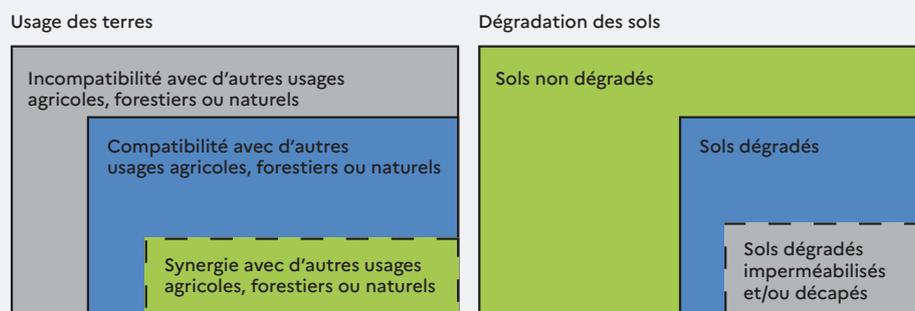
en forêt par rapport à aujourd'hui, ce qui constitue un puits de carbone. Cependant, cette augmentation est légèrement plus importante dans S1 et S2 par rapport S3 et S4 et on peut aussi faire l'hypothèse que cela ne concerne pas la même typologie de bois mort (plutôt lié à des résidus des coupes dans S3 et S4 et au maintien des arbres morts dans S1 et S2).

4.3. Développement des énergies renouvelables

Cette rubrique présente la méthodologie tandis que les résultats seront présentés dans la **section 5.2**. L'objectif de cette analyse est d'estimer l'impact du développement des énergies renouvelables (EnR) sur l'artificialisation et la qualité des sols dans les scénarios Transition(s) 2050 sur le territoire métropolitain. Cette analyse reste exploratoire au regard du faible nombre de références disponibles, mais elle permet de donner des ordres de grandeurs et de prioriser les enjeux. Sont considérées l'emprise totale ainsi que deux dimensions de l'artificialisation [38]⁶ :

- l'usage des terres des sites de production d'EnR, c'est-à-dire la compatibilité de l'installation avec un usage de l'espace comme espace naturel, agricole ou forestier (ENAF) ;
- la qualité des sols, c'est-à-dire le niveau de dégradation des sols (ou le niveau de pertes de fonctions hydriques, climatiques et biologiques au sens de la loi Climat) induite par le développement des EnR (soit lié au site de production ou à l'approvisionnement pour la biomasse énergie).

Figure 1 Principes de l'estimation de l'artificialisation induite par le développement des énergies renouvelables selon les dimensions « usage des terres » et « dégradation des sols »



Note de lecture : les pointillés indiquent que les catégories « Synergie avec d'autres usages ENAF » et « Sols dégradés imperméabilisés/décapés » sont respectivement incluses dans les catégories « Compatibilité avec d'autres usages ENAF » et « Sols dégradés ».

⁵ Toujours en restant sous l'accroissement biologique des forêts qui constitue un élément important pour assurer leur durabilité.

⁶ L'ADEME identifie trois dimensions à l'artificialisation. La troisième dimension de l'artificialisation, non considérée ici, est la fragmentation de l'espace qui peut affecter des continuités écologiques, hydrologiques...

La **Figure 1** précédente illustre les principes de cette estimation.

Au regard des données disponibles, les estimations n'ont pu être réalisées que sur une partie de ces catégories. Par exemple, l'estimation a été possible pour l'imperméabilisation mais pas pour la dégradation des sols. Cela est précisé ci-dessous en distinguant l'approche pour les sites de production d'EnR et l'approche pour les surfaces liées à la production de biomasse énergie.

SITES DE PRODUCTION D'EnR

Pour ces sites, des ordres de grandeurs de surfaces ont pu être estimés pour :

- la surface totale pouvant être affectée par les EnR⁷ (intégrant les sites de production et l'approvisionnement pour la biomasse énergie), que ce soit en termes d'usage des sols ou de dégradation des sols ;
- les surfaces strictement incompatibles avec un usage naturel, agricole ou forestier en lien avec les sites de production. Elles comprennent les sols imperméabilisés, bâtis et couverts par des voies d'accès (hors dessertes forestières, ouvertures des cloisonnements forestiers...)⁸ ;
- les sols imperméabilisés, c'est-à-dire recouverts par un matériau imperméable.

Les surfaces dégradées et non dégradées (autres qu'imperméabilisées) ainsi que les surfaces compatibles et en synergie avec un usage ENAF n'ont pas été distinguées, car celles-ci dépendent généralement d'hypothèses sur la gestion des espaces encore mal caractérisées à ce jour et les impacts varient selon les contextes (ex. : synergie entre centrales photovoltaïques au sol et usage agricole ; impacts de l'augmentation des prélèvements de bois pour l'énergie sur la qualité des sols forestiers). Par ailleurs, au sein de la compatibilité avec des usages ENAF, certaines incompatibilités existent. Par exemple, les centrales photovoltaïques au sol et les installations de géothermie de surface sont incompatibles avec un couvert forestier.

Les énergies considérées sont :

- photovoltaïque et le solaire thermique ;
- éolien offshore et l'éolien terrestre ;
- géothermie profonde et de surface ;
- méthanisation (infrastructures et surfaces agricoles pour la production de biomasse) ;
- bois-énergie (chaufferies et surfaces forestières pour l'approvisionnement en biomasse) ;
- biocarburants (infrastructures, surfaces agricoles et forestières pour la production de biomasse).

Ne sont pas incluses dans l'analyse les surfaces liées aux réseaux et au stockage de l'énergie qui n'ont pas été modélisées, ainsi que l'hydroélectricité qui n'évolue pas dans les scénarios Transition(s) 2050. Les références ayant servi de base au calcul des surfaces liées aux sites de productions sont présentées dans les **Tableaux 2 et 3** pour le solaire, l'éolien, la géothermie, la méthanisation et les chaufferies bois. Pour les biocarburants, une analyse préliminaire *via* Google Maps des surfaces occupées par les unités industrielles françaises de production de biodiesel et de bioéthanol donne des valeurs comprises en 2 ha (Lezoux) et 64 ha (La Mède). On estime ainsi une surface actuelle de site industriel de 115 ha pour le biodiesel et 50 ha pour le bioéthanol. Dans les scénarios, on fait l'hypothèse que les nouvelles productions sont mises en place par mobilisation de sites industriels existants, notamment les sites pétroliers.

⁷ Ces surfaces correspondent à la zone de co-usage telles que définies dans [39] dans le chapitre 12 (voir l'exemple de l'éolien en Figure 12.50 de ce rapport).

⁸ Ces surfaces correspondent aux surfaces artificialisées telles que définies dans [39], cf. note ci-dessus pour détail.

Tableau 2 Références identifiées pour le solaire, l'éolien et la géothermie

	Surface totale affectée	Incompatibilité stricte ENAF	Sols imperméabilisés	Sources
Photovoltaïque et solaire thermique, éolien et géothermie				
Photovoltaïque au sol (panneaux fixes)	1 à 2 ha/MW	0,09 ha/MW	0,002 ha/MW	[39] [40]
Photovoltaïque au sol (tracker)	2 à 2,9 ha/MW	0,002 ha/MW	0,002 ha/MW	[41] [42]
Photovoltaïque sur toiture	0,5 ha/MW	-	-	
Solaire thermique au sol	0,2 à 0,5 ha/MW	0,14 ha/MW	0,002 ha/MW	[41] [43]
Éolien terrestre	8 à 18 ha/MW	0,12 à 0,19 ha/MW	0,02 ha/MW	[39] [40] [44]
Éolien offshore	10 ha/MW	0,1 ha/MW	0,001125 ha/MW	[44]
Géothermie profonde	~ 5 ha/TWh	~ 5 ha/TWh	~ 3 ha/TWh	[45]
Géothermie de surface	100 à 1875 ha/TWh*	-**	-***	[44]****
Méthanisation				
Injection, moyenne ([< 120 Nm ³ /h -> 180 Nm ³ /h])	2.2 ([1.1 – 3.1])	100 %*****	30 %*****	[46]
Co-génération, moyenne ([< 140 kW -> 300 kW])	1.1 ([0.5 – 1.5])			

Légende :

* Les valeurs basses correspondent aux sondes verticales et les valeurs hautes aux capteurs horizontaux. Nous avons ici considéré 90 % de capteurs horizontaux et 10 % de sondes verticales.

** En considérant qu'un usage en espace vert ou agricole est possible au-dessus du champ de sondes ou capteurs horizontaux.

*** En considérant les pompes à chaleurs incluses dans le bâti existant.

**** Calculs experts ADEME.

***** Hypothèse définie du fait de l'absence de données capitalisées.

Note de lecture : valeurs moyennes considérées dans l'évaluation des scénarios, exception faite du solaire photovoltaïque au sol (panneaux fixes) où est faite l'hypothèse de parcs plus extensifs dans S1 (2ha/MW surfaces affectées en moyenne en 2050) similaire à l'actuel dans le S3 (1,4 ha/MW de surfaces affectées en moyenne en 2050) et plus intensifs dans S2 et S4 (1 ha/MW de surfaces affectées en moyenne en 2050). Dans les scénarios intensifs, on fait également l'hypothèse d'une incompatibilité fortement accrue avec des usages ENAF (0,5 ha/MW en moyenne en 2050).

Tableau 3 Estimation de l'emprise au sol des chaufferies bois en 2021

Plage de puissance des chaufferies (kW)		Nombre de chaufferies sur le territoire en 2021	Hypothèse ratio m ² chaufferie par kW	Hypothèse ratio m ² terrain incluant enrobé par kW	Surface totale de chaufferies (ha)	Surface totale de terrain incluant enrobé (ha)
50	300	4 702	0,35	-	18	0
300	1 000	1 256	0,35	0,92	21	56
1 000	2 000	405	0,20	0,60	11	33
2 000	5 000	386	0,20	0,60	23	68
5 000	10 000	165	0,15	0,60	17	69
10 000	20 000	74	0,12	0,30	12	30
20 000	50 000	56	0,12	0,30	19	48
> 50 000		24	0,10	0,25	22	56
TOTAL		7 068			144	360

Note de lecture : dans cette exercice, le ratio ha/kW « moyenne France » est considéré constant pour tous les scénarios. Pour les chaufferies bois dont la puissance est comprise entre 50 kW et 300 kW, la chaufferie est considérée comme incluse dans un bâtiment préexistant.

Source : [47].

SURFACES DE PRODUCTION DE BIOMASSE POUR L'ÉNERGIE

Les surfaces liées à la production de biomasse issue des cultures énergétiques sont calculées à partir des besoins en biomasse pour chaque énergie et des rendements des cultures (cf. chapitre 2.4.2. *Ressources et usages non alimentaires de la biomasse* du rapport Transition(s) 2050). Sont distinguées :

- les surfaces en co-usage où la concurrence avec l'alimentation ou les matériaux est limitée. Ces surfaces comprennent les cultures intermédiaires à vocation énergétiques (CIVE) et les surfaces forestières nécessaires pour le maintien de niveau de récolte de plaquettes forestières pour l'énergie ;
- les surfaces dédiées à l'énergie. Celles-ci comprennent les cultures lignocellulosiques pour la combustion et/ou les biocarburants et les cultures dédiées aux biocarburants conventionnels (dits de première génération).

Les surfaces liées à la production de biomasse dans les forêts existantes en co-usage avec une récolte pour les matériaux sont calculées pour différents modes de sylvicultures (taillis, futaies) et niveaux de fertilité possibles. Cela permet d'estimer un ordre de grandeur théorique des surfaces affectées. Les paramètres de sylviculture et la part de la récolte pour l'énergie sont définis à partir de cas d'étude de l'annexe 14 de [48]. 70 % de la récolte est orientée vers l'énergie en taillis, 39 % en futaie résineuse et 62 % en futaie feuillue. La proportion des modes de sylvicultures contribuant à la récolte actuelle n'est pas connue et elle n'a pas été définie pour les scénarios futurs.

4.4. Construction neuve de bâtiments

APPROCHE DE MODÉLISATION

L'analyse repose sur une approche en deux étapes [49]⁹ :

- **projeter le besoin en construction des espaces bâtis** (surface de plancher) au niveau national ;
- **évaluer l'artificialisation correspondante.**

Pour cela la formule suivante inspirée de [31] a été utilisée :

$$An = [SDP \times (1-RU) / DB] - N$$

An : surface artificialisée nette chaque année.

SDP : surface de plancher construite chaque année.

RU : taux de renouvellement urbain. Dans le contexte de ce travail et tenant compte des données disponibles, ce taux représente la part des constructions réalisées à l'intérieur de la tâche urbaine.

DB : densité bâtie des constructions artificialisantes (= surface de plancher / superficie artificialisée mesurée).

N : surfaces renaturées., i.e. surfaces artificialisées rendues à un état naturel, agricole ou forestier (sans distinction).

⁹ Cette publication vise à évaluer la faisabilité et les conditions nécessaires à l'atteinte de l'objectif de Zéro artificialisation nette. Cette étude explore les leviers utiles pour réduire la consommation des espaces naturels, agricoles et forestiers.

PÉRIMÈTRE

Ce travail se concentre sur la consommation d'espaces naturels, agricoles et forestiers (ENAF), à l'échelle nationale et sans distinction du type ou de la proportion relative entre eux. Les données reposent sur une exploitation des Fichiers fonciers opérée par le CEREMA. Ces fichiers décrivent le foncier, les locaux et les différents droits de propriété y afférents. Ils sont donc liés aux parcelles cadastrales. Leur exploitation permet d'intégrer la surface occupée par le bâti ainsi que les alentours immédiats artificialisés (cour, allée, parking, jardin). Les infrastructures de transport, voiries de desserte, trottoirs, etc. extérieurs à la parcelle bâtie ne sont donc pas considérées. Pour plus d'informations et une comparaison avec d'autres sources de données [30] [50]. Pour l'analyse de l'impact des scénarios Transition(s) 2050 :

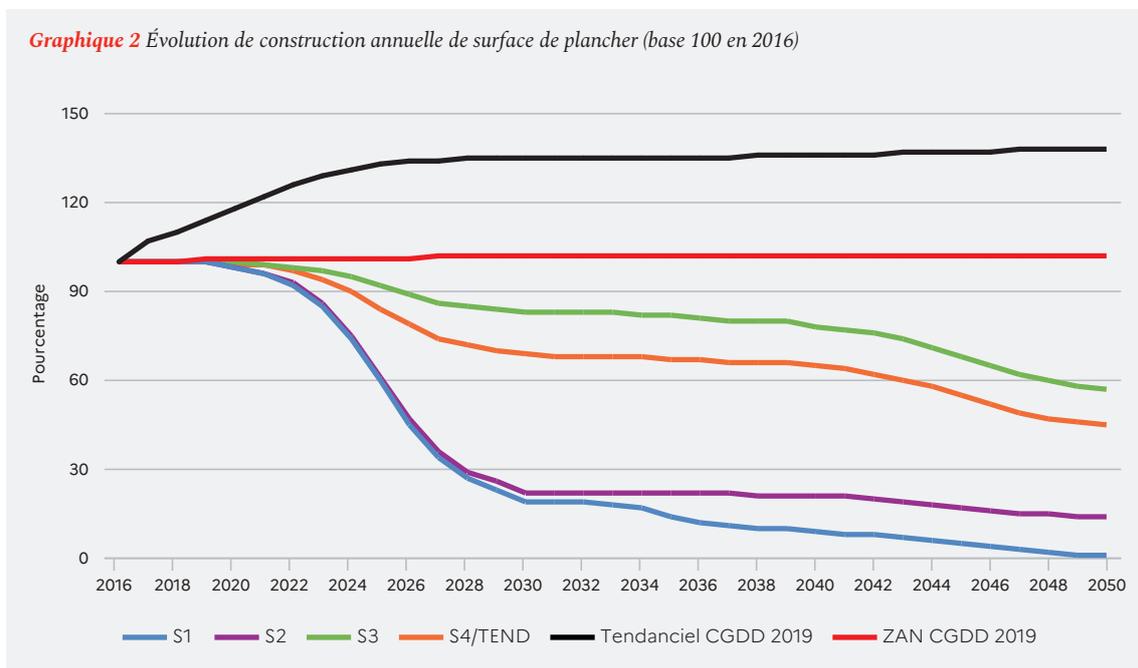
- les surfaces de plancher introduites dans le modèle sont directement issues de la modélisation de Transition(s) 2050 (modèles ANTONIO, PEPITO et VIVALDI¹⁰) (cf. chapitre 2.2.2. **Bâtiments résidentiels et tertiaires** du rapport Transition(s) 2050). Elles suivent donc la philosophie propre à chaque scénario¹¹ ;

- un travail spécifique a été réalisé pour traduire la philosophie des scénarios sur le taux de renouvellement urbain (RU) et la densité bâtie (DB), principaux leviers de l'artificialisation [31] ;
- afin d'estimer l'impact en termes d'artificialisation, il a été décidé de ne pas introduire dans un premier temps de paramètre de renaturation (N). L'analyse permet ainsi d'estimer les surfaces de renaturation nécessaires dans chaque scénario pour atteindre l'objectif ZAN.

Les valeurs de ces paramètres évoluent donc dans le temps et par scénario pour représenter le niveau d'effort consenti.

VOLUMES BATIS

Le **Graphique 2** présente l'évolution de la surface de plancher construite par scénario. Ils impliquent une baisse plus ou moins significative et rapide. S1 aboutit à un flux de zéro construction à l'horizon 2050¹².



¹⁰ Périmètre : résidentiel (résidences principales), tertiaire CEREN, bâtiments industriels et agricoles (y compris entrepôts).

¹¹ Pour ce faire, dans la publication du CGDD, les données de la base Sit@del concernant le permis de construire à la date de mise en chantier sont mobilisées. Ces volumes exprimés au niveau de chaque commune sont régressés sur les caractéristiques socio-économiques de ces dernières (population, taille moyenne de ménage, nombre d'emplois et leurs évolutions, part des emplois en secteur agricole, taux de taxe foncière, montant de la dotation de fonctionnement, capacité d'accueil touristique, accessibilité par transport, exposition aux risques naturels et disposition des aménités naturelles).

¹² Afin d'évaluer le volume total de construction, la méthode précédemment appliquée par le CGDD basée sur une prolongation de tendances a également été testée. La projection introduit donc implicitement des évolutions tendanciennes en termes de consommation de surface bâtie par usage ou d'obsolescence (destruction). Les résultats projettent une stabilisation des volumes de construction à un niveau relativement haut (environ 60 % des valeurs de 2016). Transition(s) 2050 a introduit des hypothèses plus volontaristes et produit des projections plus contrastées.

TAUX DE RENOUVELLEMENT URBAIN

Entre 2005 et 2013 (*Tableau 4*), 43 % des constructions ont été réalisées en densification ou renouvellement des espaces bâtis existants, assimilés à du renouvellement urbain, contre notamment 8 % en artificialisation de masse et 24 % en mitage [30].

- Dans S1, S2 et S3, l'artificialisation de masse et le mitage disparaissent au profit de la densification (58 %) et de la construction en continuité de bâti (42 %).
- Dans S4, les proportions n'évoluent pas par rapport aux tendances passées.

LA DENSITÉ BATIE DES CONSTRUCTIONS ARTIFICIALISANTES (DB)

Elle est estimée à 0,15 en 2016 [49]. Elle correspond à l'efficacité de la construction ou efficacité de l'artificialisation, calculée en rapportant les m² construits aux m² artificialisés. On considère que son évolution varie proportionnellement à celle

de la densité nette du bâti résidentiel. Cette dernière dépend d'un côté, de la part respective des maisons individuelles (diffuses/groupées) et des logements collectifs dans la construction neuve et, de l'autre, de la densité parcellaire¹³ pour chacun de ces trois types de logements.

- La part respective des maisons individuelles diffuses, groupées et des logements collectifs est une donnée de l'exercice Transition(s) 2050. Elle est présentée dans le *Tableau 4*.
- La densité parcellaire associée à chaque type de bâti a été calibrée en fonction des densités observées au début des années 2000 [51]. Elle est présentée en *Tableau 4*. Pour l'ensemble des scénarios à l'exception du S3, on considère que la densité parcellaire de chaque type de bâti n'évolue pas par rapport à la situation actuelle : c'est la part respective des types de bâti qui explique les évolutions de la densité. Dans S3, la densité augmente légèrement pour les logements sociaux.

¹³ La densité parcellaire est le rapport entre le produit (emprise au sol du bâti x hauteur moyenne) et la surface de l'îlot. L'Institut Paris Région a proposé une classification des habitats selon leur densité parcellaire sur la base d'un travail d'observation [51].

Tableau 4 Synthèse des hypothèses du secteur bâtiment (taux de renouvellement, densité du bâti, types de logements...)

Taux de renouvellement : progression du bâti par type de construction				
Type d'artificialisation	Hectares	Proportion (2005-2013), % [30]	TEND et S4	S1, S2 et S3
Type 1 – Densification ou renouvellement du bâti	88 720	43	43	58
Type 2 – Artificialisation de masse	15 626	8	8	0
Type 3 – En continuité de bâti	53 993	26	26	42
Type 4 – Mitage	49 285	24	24	0

Part (%) des différents types de logements dans la construction neuve par scénario				
	2015-2020	2021-2030	2031-2040	2041-2050
S1/S2				
Maisons individuelles	45	35	20	15
<i>dont maisons individuelles diffuses</i>	33	26	10	4
<i>dont maisons individuelles groupées</i>	9	7	5	3
Logements collectifs	55	65	80	85
<i>dont logements sociaux</i>	15	15	15	15
<i>dont copropriétés</i>	40	50	65	70
S3				
Maisons individuelles	45	40	35	25
<i>dont maisons individuelles diffuses</i>	33	30	26	18
<i>dont maisons individuelles groupées</i>	9	8	7	5
Logements collectifs	55	60	65	75
<i>dont logements sociaux</i>	15	15	15	15
<i>dont copropriétés</i>	40	45	50	60
TEND/S4				
Maisons individuelles	45	45	45	45
<i>dont maisons individuelles diffuses</i>	33	33	33	33
<i>dont maisons individuelles groupées</i>	9	9	9	9
Logements collectifs	65	65	65	65
<i>dont logements sociaux</i>	15	15	15	15
<i>dont copropriétés</i>	40	40	40	40

Densités parcellaires par scénario ([49] et estimations ADEME d'après [51])				
Type de logement	Densité 2015	TEND/S1/S2	S3	S4
Maison individuelle diffuse	0,540	0,540	0,540	0,540
Maison individuelle groupée	1,000	1,000	1,000	1,000
Logement collectif social	1,500	1,500	1,500 puis 2,000 à partir de 2030	1,500
Logement collectif copropriété	2,255	2,255	2,255	2,255

RÉCAPITULATIF DES PARAMÈTRAGES

Le **Tableau 5** récapitule les principaux paramétrages des scénarios. Les valeurs considérées dans l'exercice de définition de trajectoires possibles

pour atteindre l'objectif ZAN du CGDD sont également données à titre de comparaison [49].

Tableau 5 Paramètres de projection de l'artificialisation

	Exercice CGDD 2019		Transition(s) 2050			
	Tendanciel	ZAN	S1	S2	S3	S4
1. Taux de vacance (% du parc)						
2030	8	6	6	8		
2. Taux de renouvellement urbain (%)						
2016 (estimation)	42		42			
2030	42	50	49		42	
2050	42	70	58		42	
3. Densité bâtie des constructions artificialisantes (m²/m²)						
2016 (estimation)	0,15		0,15			
2030	0,15	0,30	0,20	0,22	0,15	
2050	0,15	0,45	0,21	0,25	0,15	
4. Restauration d'espaces naturels (ha/an)						
2016 (estimation)	500		-	-	-	-
2030	500	1 500	-	-	-	-
2050	500	3 000	-	-	-	-

4.5. Secteur transports

Les quantifications suivantes sont proposées pour les modes de transport :

ROUTIER – MODES MOTORISÉS

Au vu des tendances récentes et des récits des scénarios, il est considéré **2 catégories de routes** en croissance et menant à une artificialisation supplémentaire : les infrastructures rapides (essentiellement des autoroutes) et les routes communales. Les routes départementales et nationales ne sont, de ce fait, pas détaillées par la suite. Pour ce qui est des **infrastructures rapides**, des autoroutes sont encore construites dans S3 et S4, alors que les nouveaux projets sont abandonnés dans S1 et S2 dès le début des années 2020. Pour les **routes communales**, les dernières années et décennies montrent un rythme de construction de l'ordre de 6 000 km par an [33], en lien avec les dynamiques d'étalement urbain dans l'aménagement des logements et des activités.

ROUTIER – INFRASTRUCTURES CYCLABLES :

Pour les **transformations d'infrastructures existantes** (ex. : infrastructures cyclables en milieu urbain), il est considéré qu'elles n'entraînent pas d'artificialisation supplémentaire, en reprenant essentiellement de la voirie sur la voiture. En revanche, une partie des **infrastructures cyclables interurbaines** se développent *via* des infrastructures dédiées dans les scénarios de développement ambitieux d'infrastructures cyclables : en priorité S2, ensuite S1, puis S3.

FERROVIAIRE

Pour le transport ferroviaire, seules des **extensions du réseau de lignes à grande vitesse (LGV)** sont envisagées dans les scénarios et quantifiées en termes d'artificialisation. En effet, le réseau de lignes classiques est soit stable soit poursuit sa

lente décroissance à l'horizon 2050. Et les nouvelles infrastructures en surface dans les zones urbaines (en particulier les tramways) sont supposées se faire sur des terrains déjà artificialisés.

AUTRES MODES

Pour les transports **fluvial et maritime**, il n'est pas considéré de nouvelles surfaces artificialisées (volumes faibles actuels et/ou faibles extensions prévues dans les scénarios). Pour le transport **aérien**, une hausse des surfaces artificialisées et imperméabilisées est prévue en rapport aux surfaces de 2015, pour les scénarios qui prévoient des extensions d'aéroports d'ici 2050 (TEND, S3 et S4).

ENTREPÔTS

L'évolution des surfaces mobilisées sont projetées à partir des tendances de ces dernières années (et notamment les chiffres sur 2010-2015) et selon le niveau de développement des **entrepôts logistiques** dans les scénarios, en lien en particulier avec le e-commerce. Des pourcentages équivalents à ceux de 2015 sont retenus pour les parts de surfaces artificialisées et imperméabilisées.

5. Impacts des scénarios prospectifs sur les sols

5.1. Secteurs agricoles et forestiers

Dans le cadre du projet SISAE [36], des hypothèses ont été faites en termes de changement d'affectation des sols, afin de répondre à la demande alimentaire et équilibrer les surfaces restantes en cohérence avec la philosophie développée dans les autres secteurs (comme expliqué précédemment, sans qu'un rebouclage quantifié n'ait été réalisé avec lesdits secteurs) (*Graphique 3*).

Dans le scénario tendanciel, la Surface Agricole Utile (SAU) perd 3,7 millions d'hectares dont 2,9 de terres arables (sous l'effet notamment de l'artificialisation qui en gagne 2,1 Mha) et au profit également de la forêt qui progresse de 1,7 Mha, gagnés sur les terres arables, sur les landes et sur les prairies. La plupart des cultures voient leurs surfaces diminuer, excepté soja, protéagineux et cultures légumières. Par ailleurs 100 kha de prairies dites productives voient leurs rendements chuter sous l'effet du climat et passent dans la catégorie « prairies peu productives ». Les déterminants principaux du scénario tendanciel impactant les sols sont l'artificialisation, les pratiques agricoles conventionnelles et le développement des surfaces forestières. L'importante artificialisation des sols dans ce scénario impacte nécessairement l'ensemble des fonctions et services rendus par les sols (sauf celui de support d'infrastructures). Ce changement d'affectation de sols forestiers, agricoles ou de prairies entraîne de fait une réduction du stock de carbone et du puit potentiel. Les risques érosifs et d'inondations s'accroissent potentiellement du fait d'une réduction de la capacité de tampon des sols artificialisés. Les pratiques agricoles conventionnelles génèrent des impacts similaires aux systèmes actuels : pollution des sols et écosystèmes associés aux métaux lourds et pesticides, excédent d'azote, réduction du taux de matière organique et baisse de la fertilité, tassement... Certaines données suggèrent que le maintien d'une fertilisation minérale sur le long terme pourrait impacter la stabilité des agrégats et donc la structure du sol [52]. En parallèle, les leviers agroécologiques et les bénéfices associés sur la qualité des sols (réservoir de biodiversité, amélioration de la fertilité par retour au sol des résidus et plus fréquente couverture des sols,

capacité de filtration et rétention des eaux...) restent localisés car le développement des systèmes « bas intrants » et « production raisonnée » n'occupent pas une part importante de la SAU (30 % de la SAU en 2050). La composante « couverture des sols » s'améliore légèrement en raison du doublement des cultures intermédiaires et du développement concomitant de surfaces enherbées dans les vignes et vergers. L'utilisation croissante (x 1,5 par rapport à l'état actuel) de matières fertilisantes organiques (MAFOR) permet de participer au maintien voire à l'augmentation des teneurs en matières organiques des sols en ayant reçu à l'horizon 2050 [53]. Ces flux de MAFOR risquent de s'accompagner de flux de métaux lourds, qui n'ont pas été chiffrés ici.

Le développement des forêts sur près de 2 Mha d'origine agricole ou prairiale modifiera progressivement localement les caractéristiques biologiques et chimiques des sols. En fonction du type d'exploitation forestière et de l'évolution de la mécanisation, de potentiels impacts en termes de tassement sont à craindre sur ce scénario qui constitue une continuité de pratiques sylvicoles actuelles équivalant au S2 en termes de niveau de prélèvement de bois. La non-récolte de menus bois limite le risque de baisse de fertilité ainsi que les impacts sur le stockage de carbone. Cependant, la mise en œuvre effective de cette limitation de la récolte dépendra également des évolutions du taux de mécanisation et des solutions techniques permettant de limiter la récolte des menus bois dans les chantiers mécanisés. Les récoltes en zones de forte pente sont également limitées dans le scénario.

Dans S1, du fait d'une évolution profonde des régimes alimentaires, la forêt gagne plus de 3 millions d'hectares par conversion de prairies, de terres arables et par évolution spontanée des landes et friches. Les surfaces artificialisées ne progressent pas. Au contraire, elles perdent près de 200 kha au profit principalement des espaces naturels. Ceux-ci progressent globalement et gagnent sur les terres arables, du fait de la déprise agricole et d'actions volontaires de restauration des écosystèmes. Les terres arables voient leur surface diminuer au profit de la forêt, des espaces naturels

et semi-naturels et sont en outre maillés par des infrastructures agroécologiques occupant 5 % des terres arables, l'ensemble constituant une très vaste trame verte. Les réserves naturelles intégrales voient leur surface augmenter considérablement. Les prairies temporaires voient leur surface divisée par 3 au profit des cultures de céréales et d'oléoprotéagineux, des fruits et des légumes.

Dans S2, La forêt gagne un million d'hectares par évolution spontanée des landes et des prairies. Les surfaces artificialisées sont contenues et ne gagnent que 300 kha. Les cultures fourragères régressent de 2 millions d'hectares au profit des grandes cultures, des légumes et des fruits (multiplication par 2,5 : les surfaces de maraîchage et d'arboriculture passent de 450 kha à 1,3 Mha) tandis que la vigne régresse.

En termes d'impacts sur la qualité des sols, les déterminants principaux de S1 et S2 sont l'évolution des pratiques agricoles et le développement des surfaces forestières. Le développement important des systèmes très bas intrants et raisonnés impliquent l'accroissement des pratiques agroécologiques bénéficiant généralement aux sols sur l'ensemble du territoire. Par exemple, le développement important des couverts végétaux (cultures intermédiaires) dans les rotations des grandes cultures et la réduction de l'usage des substances de synthèse (fertilisation et traitement), contribueront au renforcement de la fertilité du sol et de son bon fonctionnement. Cette fonction devient centrale, la séquestration additionnelle de carbone est alors significative dans les sols cultivés, compensant près de la moitié des émissions brutes agricoles (directes et indirectes). Néanmoins, cette transition est longue dans la mesure où des sols historiquement appauvris prennent du temps à retrouver toute ou partie de leurs qualités potentielles après mise en place des bonnes pratiques de gestion. Certains impacts sur les sols demeurent incertains et nécessiteraient des études plus poussées de niveau régional voire territorial pour évaluer les conséquences du changement de pratiques agricoles selon le type de sol et sa qualité d'origine. Par exemple, le moindre travail du sol (développement des techniques de semis direct), pourrait apporter des bénéfices intéressants (valorisation de l'humidité résiduelle post récolte du sol, particulièrement significatif dans une perspective de sécheresse plus fréquente et de plus grande ampleur), mais ces techniques pourraient aussi provoquer localement des risques d'accentuation de l'acidification des sols agricoles du fait d'une accumulation dans les horizons de surfaces de cette acidité après apport de fertilisants organiques.

Quant aux impacts de la sylviculture sur la qualité des sols, la limitation de l'augmentation de la récolte de bois dans S1 et S2 réduit le risque

de générer des impacts négatifs. Les impacts sur les zones humides, cours d'eau ou habitats naturels nécessiteraient des évaluations plus fines. Notons cependant que dans S1 et S2, on peut faire l'hypothèse qu'il y aura plus des surfaces en protection forte ou avec une cadence de coupes plus faibles. Cependant, les impacts effectifs dépendront de la mise en œuvre des chantiers sylvicoles et du respect des recommandations pour maintenir la fertilité des sols, limiter les risques de tassement et d'érosion, préserver les habitats, les zones humides et les cours d'eau. Des guides de bonnes pratiques de récolte permettant de limiter les risques sont disponibles [48].

Dans S3, la SAU recule de 3,7 Mha et les terres arables de 1,9 Mha. Les surfaces artificialisées progressent de 800 kha, la forêt de 2,5 Mha. Celle-ci progresse à partir des prairies naturelles (1,4 Mha), des cultures fourragères qui perdent 1,5 Mha, des terres arables (0,9 Mha) et des landes (0,6 Mha). Les cultures maraîchères gagnent 120 kha, l'arboriculture 110 kha et la vigne en perd 130. Les espaces naturels gagnent 320 kha. Les espaces peu anthropisés gagnent au total 3,3 Mha. Concernant les impacts sur la qualité des sols, les enjeux principaux du S3 concernent l'artificialisation des sols qui se poursuit et dégrade l'ensemble des fonctions des sols, le développement de pratiques agroécologiques et la gestion forestière. Dans ce scénario, les pratiques de couverture des sols rivalisent en surface et efficacité avec celles du S1 (fort développement des cultures intermédiaires). Ainsi, la fertilité des sols progresse sans pour autant atteindre les niveaux de séquestration de S1 ou S2, du fait de prélèvements plus importants et d'un usage plus élevé de produits de synthèse.

Concernant la sylviculture, les risques de générer des impacts négatifs sur la qualité des sols augmentent avec un plus fort niveau de prélèvements de bois si les pratiques sylvicoles ne sont pas encadrées. En effet, dans ce scénario les surfaces occupées par les chantiers mécanisés sont plus importantes, de même que les surfaces dédiées à la desserte forestière et aux cloisonnements. Par ailleurs les menus bois sont en partie récoltés, et les chantiers en zone de pente sont plus fréquents [48].

Dans S4, La forêt progresse légèrement, principalement par évolution spontanée d'espaces naturels (landes) et de prairies inexploitées. La principale évolution est l'augmentation des surfaces artificialisées qui s'effectue essentiellement au détriment des terres arables (environ 1 Mha) et des forêts (environ 0,5 Mha). Toutes les surfaces agricoles sont occupées car nécessaires : le niveau de la demande ne diminue pas car du côté de la demande, les évolutions (mineures) dans l'alimentation sont effacées par

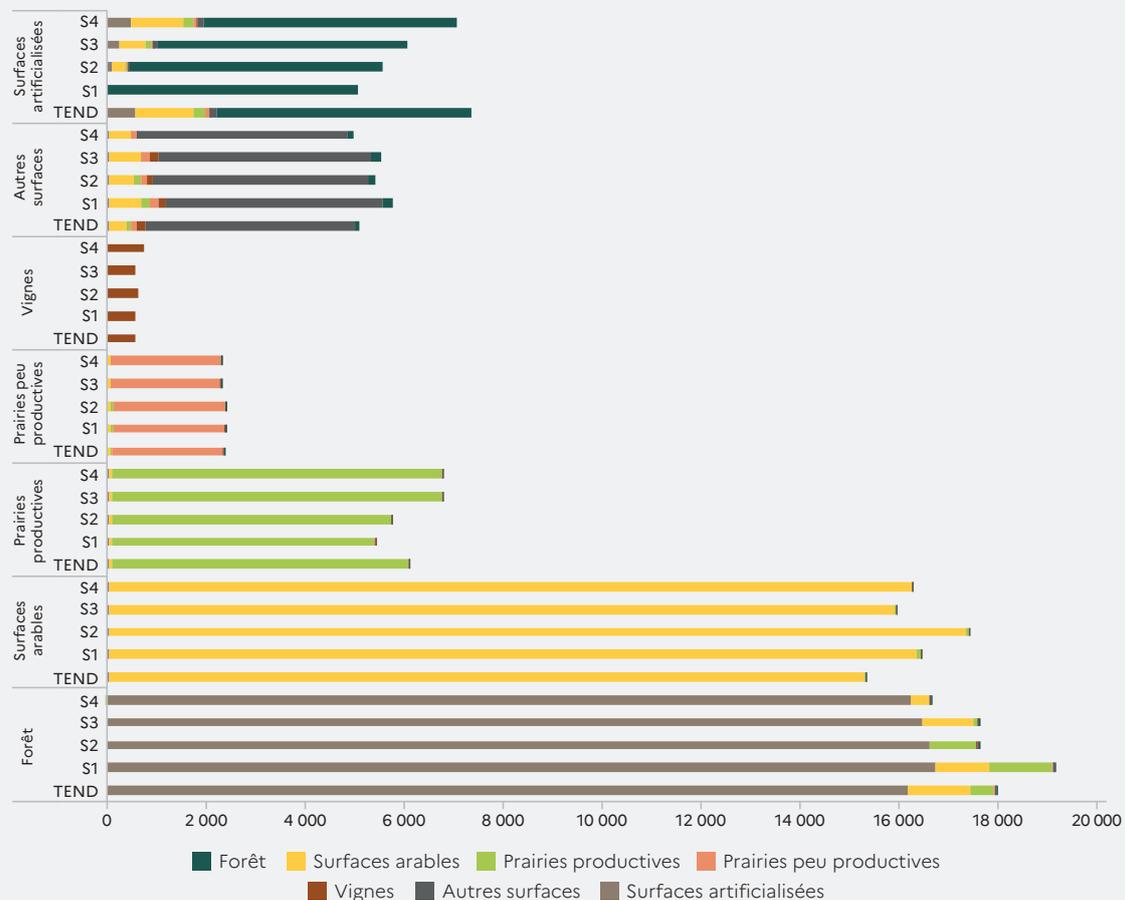
l'augmentation de la population ; du côté de la production, les rendements stagnent, car le progrès technique parvient juste à compenser les effets du changement climatique. La répartition des surfaces agricoles reste inchangée, les prairies et les terres arables occupent pratiquement la même proportion de la SAU qu'actuellement.

En termes d'impacts sur la qualité des sols, S4 est mitigé. D'une part l'artificialisation se poursuit à un rythme très important, que ce soit du fait de l'étalement urbain ou des infrastructures de transport, générant un mitage des espaces et une dégradation des services rendus par les sols. Mais d'autre part, ce scénario prévoit le déploiement massif de la couverture des sols, avec des cultures intermédiaires atteignant le niveau proposé dans S1. Il en est de même pour l'enherbement des vignes et vergers avec le niveau de couverture le plus élevé de tous les scénarios. Ces espaces agricoles voient la qualité agronomique (entre autres) de leurs sols s'améliorer. Cette amélioration de la fertilité des sols est aussi rendue possible principalement par la généralisation du semis direct offrant une certaine souplesse et efficacité pour l'implantation des

cultures dans un climat plus irrégulier. Cependant, de façon générale, du fait d'une exploitation intensive des biomasses produites, le stockage de carbone dans les sols du S4 reste finalement faible. Dans ce scénario, la majeure partie des sols demeure malgré tout perfusée aux intrants de synthèse et à l'eau d'irrigation (70 % des productions en systèmes conventionnels raisonnés), impactant de fait à la fois leur qualité globale (dégradation de la biodiversité...) et leur résilience face au changement climatique.

Le risque d'impact de la sylviculture sur la qualité des sols correspond (1) aux risques liés à l'augmentation des prélèvements et (2) aux pratiques mises en œuvre. Les hypothèses ne permettent pas de différencier le taux de mécanisation des coupes par scénario. Cependant, on peut faire l'hypothèse que l'augmentation des récoltes de bois prévue dans S3 et S4, couplée à un usage plus industriel du bois énergie, engendrera une surface des chantiers mécanisés supérieure à celle de S1 et S2. S'ajoutent à ce risque les impacts potentiels sur le stockage de carbone dans les sols et sur la biodiversité, en lien avec les plantations d'essences exotiques.

Graphique 3 Usage des sols en 2050 (kha) et changement d'usages associés (provenance des terres impactées)



N.B. : le graphique indique les surfaces futures par grandes catégories, avec leur origine en couleur, par exemple dans S1, la forêt (avant-dernière ligne du graphique) gagne 2 Mha dont 1 Mha sur les terres arables et le reste sur les prairies et sur les autres surfaces (landes). Les données de surfaces artificialisées peuvent présenter des écarts avec celles estimées dans les autres secteurs du fait de l'absence de rebouclage.

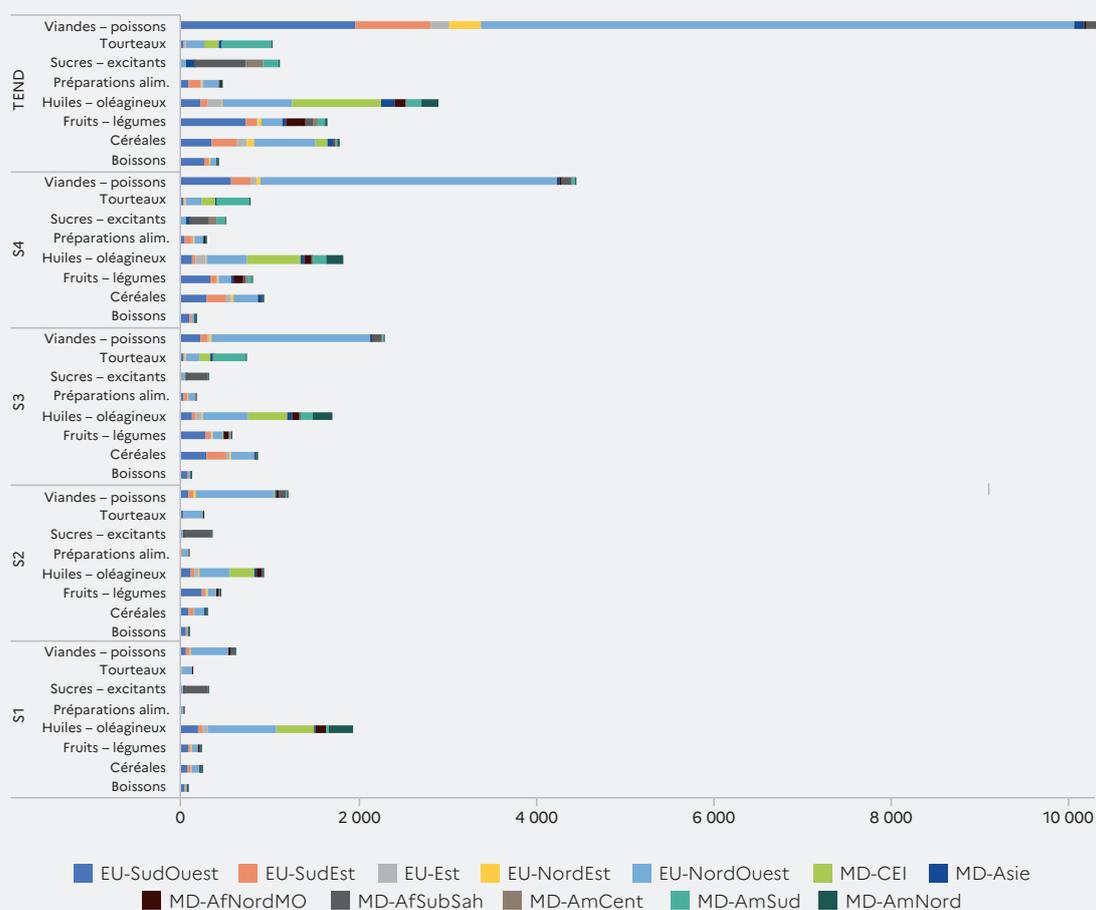
Concernant l’empreinte sol associée aux importations, quel que soit le scénario, les surfaces mobilisées pour la production des importations se situent majoritairement en Europe (Tableau 6, Graphique 4). Les émissions liées au changement d’usage des sols, présentées dans le rapport SISAIE, sont en large partie corrélées aux surfaces mobilisées. Malgré des rendements et une efficacité moins élevée des systèmes agricoles, S1 et S2 sont ceux qui mobilisent le moins de sols

à l’étranger. En effet, dans ces deux scénarios, plusieurs millions d’hectares sont libérés sous l’effet des changements de régime alimentaire, de l’amélioration des systèmes de production, de la réduction des pertes et gaspillage et de la contraction du commerce international. Par ailleurs, même S4 n’atteint pas les valeurs du tendanciel, reflétant l’intérêt des mesures prises dans ce scénario.

Tableau 6 Surfaces mobilisées (Mha) pour la production des denrées agricoles (sur le territoire et importées)

Scénario	France (SAU)	Europe	Reste du monde	Total hors France
Tendanciel	25,1	15,9	4,7	20,6
S1 – Génération frugale	25,6	2,3	1,3	3,6
S2 – Coopérations territoriales	27,7	2,8	0,9	3,7
S3 – Technologies vertes	27,2	4,8	2	6,8
S4 – Pari réparateur	26,7	7,1	2,6	9,7

Graphique 4 Surfaces mobilisées pour la production des produits importés (kha)



Les déterminants principaux des surfaces mobilisées pour les importations agricoles sont le « panier » de produits importés, particulièrement lié aux évolutions des régimes alimentaires moyens ainsi que les coefficients unitaires par tonne importée, impactés d'une part, par l'évolution des pratiques agricoles et d'autre part, par les taux d'importations d'origine européenne, région où les rendements et efficacités sont souvent plus élevés que dans le reste du monde. Les surfaces associées aux viandes et produits laitiers ainsi que pour l'alimentation animale importée (tourteaux et oléagineux, céréales) restent prépondérantes, quel que soit le scénario. Dans S3 et S4, les importations de tourteaux, d'huiles et d'oléagineux proviennent toujours majoritairement de zones hors Europe, contrairement aux autres classes de produits. On peut noter des écarts entre les résultats d'empreinte calculés dans [34] et les résultats actuels [36]. Ceux-ci proviennent du fait que le périmètre des produits importés pris en compte dans [34] est plus restreint (principalement des produits primaires ou de première transformation et plutôt les produits importés de loin donc pas les céréales, les produits laitiers, etc.). La nomenclature correspondait à la base de données « SUA » de la FAO et, contrairement au périmètre décrit dans SISAE, il s'agissait de toutes les importations de ces produits y compris celles qui peuvent être réexportées ou être utilisées pour d'autres usages qu'alimentaires. Par ailleurs, les tonnages traités dans SISAE sont plus importants et donc les surfaces.

5.2. Développement des énergies renouvelables

SITES DE PRODUCTION D'EnR

Le **Tableau 7** présente les surfaces totales potentiellement affectées par les installations de production d'énergies renouvelables que ce soit en termes d'usage ou de dégradation des sols.

Dans tous les scénarios, l'occupation de l'espace par les sites de production d'EnR progresse fortement, celle-ci étant multipliée par un facteur 5 dans S1 et par un facteur 7 dans S4. Du fait de leur caractère diffus, ce sont les installations éoliennes terrestres¹⁴ et offshore qui en représentent la part la plus importante avec des surfaces occupées allant de 900 kha (S1) à 1 300 kha (S4), devant les centrales photovoltaïques dont l'emprise est estimée entre 75 kha (S1) et 110 kha (S2). Pour comparaison, les surfaces de toitures mobilisées pour le photovoltaïque (non présentées dans le **Tableau 8**) représentent entre 28 (S1) et 62 kha (S4). Ces résultats sont similaires à ceux présentés par RTE [39].

Les surfaces strictement incompatibles avec un usage ENAF progressent dans tous les scénarios, d'environ 30 kha (S1) à 70 kha (S4). Ces valeurs représentent l'équivalent de 1 à 3,5 années de consommation d'ENAF au rythme actuel (20 à 30 kha/an). Elles sont également d'un ou deux ordres de grandeur plus faibles que les surfaces occupées. Cela est particulièrement vrai pour l'éolien, dont les surfaces d'implantation des mâts, des bâtiments de services ou des voies d'accès sont réduites et qui est favorable à un co-usage de l'espace avec l'activité agricole. Ce sont les unités de méthanisation (environ 6 400 dans S4) et les centrales photovoltaïques au sol qui ont le plus d'impacts. Pour ces dernières, l'impact peut être réduit fortement si elles sont conçues dans une logique de co-usage (S1).

Les surfaces imperméabilisées estimées sont de l'ordre de 6 à 7 kha en 2050, majoritairement liées aux installations de méthanisation.

¹⁴ Pour l'éolien terrestre, ces surfaces affectées, dont on considère qu'elles représentent une surface circulaire d'environ 400 m de rayon autour d'une éolienne de 3MW, sont toutefois largement compatibles avec un usage agricole.

Tableau 7 Surfaces affectées par les installations de productions d'énergies renouvelables en 2020 et à l'horizon 2050 dans les scénarios Transition(s) 2050

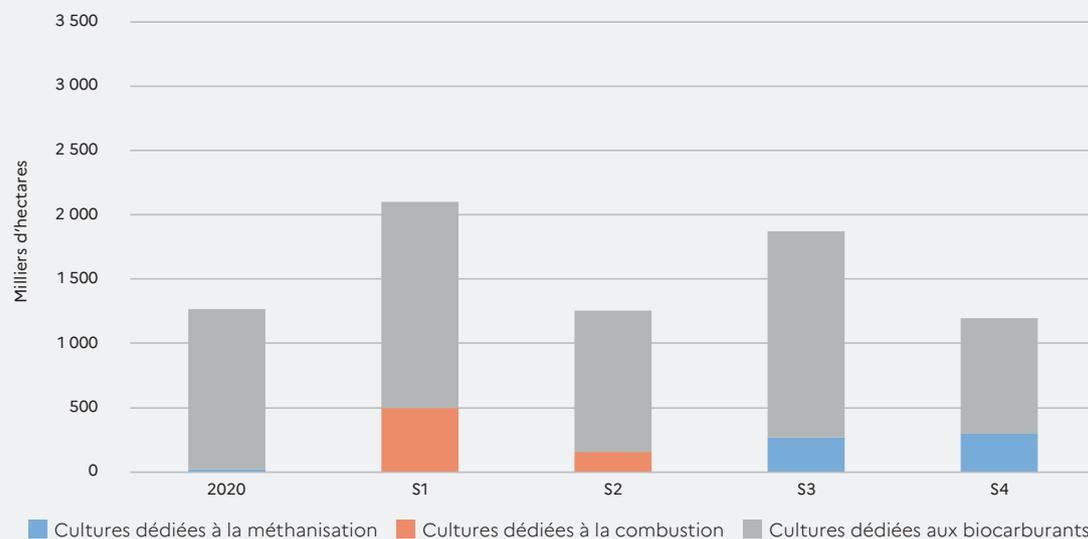
	2020	S1	S2	S3EnR-offshore	S3Nuc	S4
Emprises totales (ha)						
Photovoltaïque au sol	6 300	75 200	109 900	123 300	124 700	94 100
Éolien terrestre	214 800	750 800	819 000	750 800	750 800	819 000
Éolien offshore	0	142 000	237 500	475 000	237 500	475 000
Méthanisation	1 600	16 800	16 800	14 100	14 100	16 300
Géothermie de surface	3 100	14 900	8 700	28 900	28 900	39 700
Géothermie profonde	< 10	< 50	< 50	8 900	8 900	3 300
Chaufferies bois	400	800	1 000	700	700	600
Solaire thermique au sol	100	100	200	900	900	200
Biocarburants	200	300		300	300	300
Surfaces strictement incompatibles avec un usage ENAF (ha)						
Photovoltaïque au sol	400	2 700	18 400	22 700	23 000	39 900
Éolien terrestre	2 800	9 200	9 600	8 800	8 800	9 600
Éolien offshore	0	< 50	< 50	< 100	< 50	< 100
Méthanisation	1 600	16 800	16 800	14 100	14 100	16 300
Géothermie de surface	0	0	0	0	0	0
Géothermie profonde	< 10	< 10	< 50	8 900	8 900	3 300
Chaufferies bois	400	800	1 000	700	700	600
Solaire thermique au sol	< 50	< 50	< 100	400	400	100
Biocarburants	0	0	0	0	0	0
Surfaces imperméabilisées (ha)						
Photovoltaïque au sol	< 10	< 100	100	200	200	200
Éolien terrestre	300	1 200	1 300	1 200	1 200	1 300
Éolien offshore	0	< 50	< 50	< 100	< 50	< 100
Méthanisation	500	5 000	5 000	4 200	4 200	4 900
Géothermie de surface	0	0	0	0	0	0
Géothermie profonde	0	0	0	0	0	0
Bois énergie	400	800	1 000	700	700	600
Solaire thermique	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Biocarburants	0	0	0	0	0	0

SURFACES LIÉES À LA PRODUCTION DE BIOMASSE ÉNERGIE

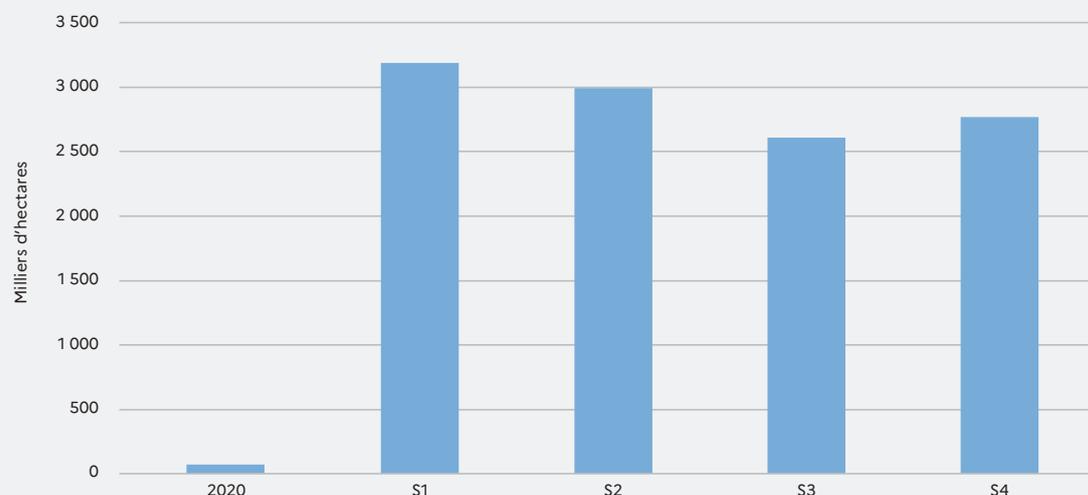
Le **Graphique 5** présente les surfaces de cultures dédiées à la production de biomasse énergie (biogaz, chaleur et biocarburants). Ces surfaces sont comprises entre 1 et 2 Mha en Métropole. Elles n'augmentent que dans S1 et S3. Ce sont principalement des surfaces de céréales, de betteraves et d'oléagineux pour les biocarburants conventionnels (qui représentent près d'1,5 Mha dans S1) et de cultures lignocellulosiques pour les biocarburants avancés (0,3 Mha dans S3 et 1 Mha dans S4). Tous les scénarios présentent également un solde importateur positif d'huiles végétales.

Les **Graphiques 6 et 7** présentent les surfaces en co-usage où la récolte de biomasse pour l'énergie se fait en complément d'une récolte pour les matériaux ou l'alimentation (humaine ou animale). Les surfaces forestières nécessaires à la récolte de bois énergie sont équivalentes (S1) ou augmentent (S3>S4>S2) par rapport à l'actuel. L'augmentation est de 42 % pour S3, ce qui représenterait 1,2 à 2 Mha, en considérant les sylvicultures testées en **Graphique 7**.

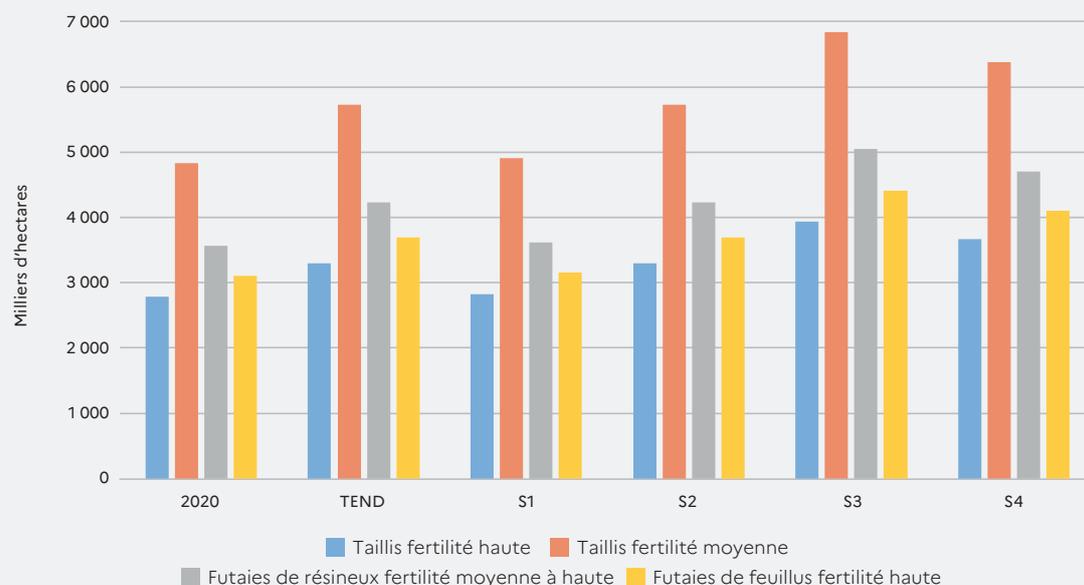
Graphique 5 Surfaces de cultures dédiées à l'énergie (biogaz, chaleur, biocarburants) en 2050



Graphique 6 Surfaces de cultures intermédiaires valorisées en méthanisation en 2050



Graphique 7 Surfaces forestières (kha) nécessaires pour le maintien de niveaux de récolte de plaquettes forestières pour l'énergie équivalents à ceux de 2020 et de 2050, pour différents modes de sylvicultures (taillis, futaies) et niveaux de fertilité possibles



N.B. : les paramètres de sylviculture et la part de la récolte pour l'énergie sont définis l'annexe 14 de [54]. 70 % de la récolte est orientée vers l'énergie en taillis, 39 % en futaie résineuse et 62 % en futaie feuillue. La proportion des modes de sylvicultures contribuant à la récolte actuelle n'est pas connue et n'a pas été définie pour les scénarios futurs.

BILAN

Tous les scénarios se traduisent par un impact fortement accru des énergies renouvelables sur l'occupation de l'espace et l'usage des sols en France, avec plusieurs millions d'hectares concernés.

La majorité de ces surfaces est favorable à un co-usage avec l'agriculture. L'articulation avec les activités agricoles paraît un enjeu clé, d'autant plus si les espaces naturels sont évités pour limiter les incidences sur la biodiversité et les besoins de surfaces de compensation. Les surfaces de cultures dédiées à l'énergie sont également significatives quels que soient les scénarios car elles représentent 4 à 8 % de la surface agricole utile (SAU). Les incidences sur la dégradation des sols sont difficiles à évaluer. Elles peuvent potentiellement concerner des surfaces importantes mais elles dépendront fortement des pratiques mises en œuvre, en particulier pour la production et la récolte de biomasse pour l'énergie. Il est à noter que l'imperméabilisation des sols, la dégradation considérée comme la plus dommageable, apparaît faible dans tous les scénarios au regard des dynamiques liées à d'autres secteurs d'activité (bâtiment, transport). Les principales énergies concernées sont l'éolien, le photovoltaïque au sol et la biomasse-énergie. Les problématiques diffèrent selon les énergies :

- l'éolien (terrestre ou offshore), est l'énergie renouvelable dont les sites de production occupent le plus l'espace (> 900 kha en 2050) quels que soient les scénarios. Néanmoins, il présente un impact réduit sur la qualité des sols et est compatible avec un usage ENAF, notamment agricole pour l'éolien terrestre. Les enjeux portent donc principalement sur la maîtrise des incidences sur les paysages, sur la biodiversité et sur la ressource halieutique pour l'éolien offshore ;
- le photovoltaïque au sol voit aussi une progression forte de son emprise bien que celle-ci reste inférieure à 200 kha. Son impact sur l'artificialisation des sols (compatibilité avec un usage ENAF, dégradation des sols) est un point d'attention. Il dépendra des caractéristiques des installations, de l'état initial du site d'implantation et des gestions du milieu mises en œuvre ;
- la biomasse-énergie sera très présente dans les systèmes de production agricole et sylvicole. Ainsi, dans tous les scénarios, les pratiques de production, de récolte et de retour au sol (ex. : digestats de méthanisation, cendre de chaufferies) liées à la biomasse énergie deviennent un enjeu important de la préservation des sols agricoles et forestiers. Celles-ci peuvent être favorables à la préservation des sols (ex. : cultures intermédiaires).

5.3. Construction neuve de bâtiments

Le **Tableau 8** présente les surfaces artificialisées dans chaque scénario en 2030 et 2050. Le **Graphique 8** présente la dynamique d'artificialisation dans chaque scénario¹⁵.

Tous les scénarios, y compris TEND et S4, s'orientent à la baisse, en lien avec celle de la construction neuve par rapport aux niveaux passés. Tous les scénarios sont en effet marqués par le ralentissement de la dynamique démographique et la stabilisation de la décohabitation liée à la baisse des naissances et à la divortialité, phénomènes que ne compense pas le vieillissement de la population. Le nombre de personnes par ménage s'oriente à la baisse à un rythme moins élevé que par le passé.

- **S1 est le moins artificialisant** en grande partie lié au volume de surface bâtie, qui y est drastiquement réduit. En 2050, la surface artificialisée est résiduelle. S2 suit une dynamique similaire.

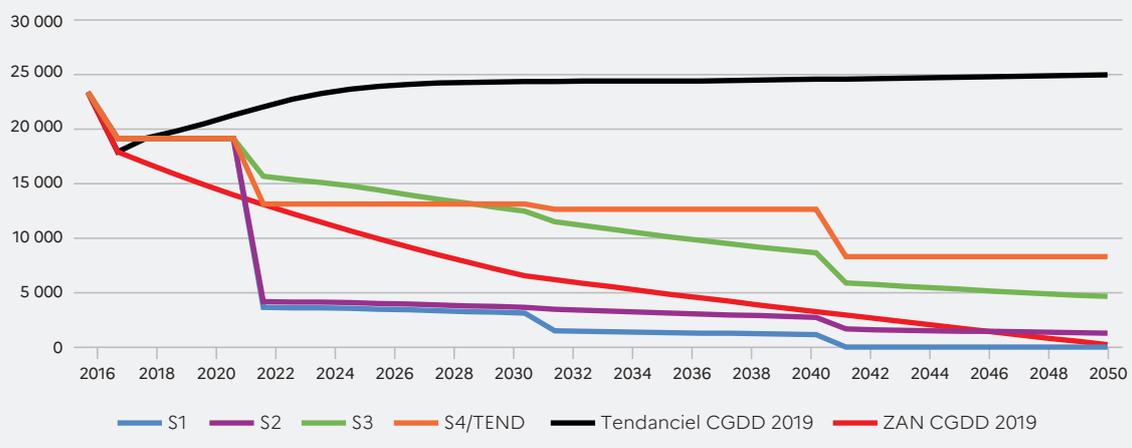
- **S4 est le plus artificialisant** et ce malgré un nombre de logements construits moins important que S3. Cela s'explique par la part plus importante de maisons individuelles dans S4 et, en miroir, par une présence plus importante de logements collectifs, moins consommateurs d'espace dans S3. C'est donc dans ce scénario que la surface à renaturer serait la plus importante pour atteindre l'objectif de Zéro artificialisation nette en 2050.

S1 arrive à des résultats similaires au scénario ZAN publié par le CGDD [49], mais via un chemin différent. Il inclut une réduction drastique de la construction alors que [49] repose sur une plus grande densité bâtie et un taux de renouvellement urbain plus important.

Tableau 8 Surfaces artificialisées en 2030 et 2050 dans chaque scénario (milliers d'hectares)

Scénario	2030 (kha/an)	2050 (ha/an)	En cumulé 2015-2050 (kha) ¹⁶	Dont cumulé 2022-2031 (kha)	Dont cumulé 2032-2050 (kha)	Dont imperméabilisation 2015-2050 (kha)	Compensation de l'artificialisation pour atteindre l'objectif ZAN en 2050
S1	3,2	< 0,1	170	55	15	< 1	0,03
S2	3,7	1,3	205	60	50	30	1,3
S3	12,5	4,7	415	165	155	75	4,7
S4/TEND	13,2	8,3	465	155	210	70	8,4

Graphique 8 Évolution des surfaces artificialisées (ha) sur la période 2015-2050 par scénario et dans [49]



¹⁵ Ces scénarios reposaient sur des projections démographiques plus hautes que celles adoptées dans Transition(s) 2050, qui est basé sur le scénario Fécondité Basse 2013 de l'INSEE.

¹⁶ Le volume de construction est similaire entre scénarios pour la période 2015-2020 car il reflète les dynamiques observées.

Quelle densité bâtie pour réduire l'impact de S3 ?

S3 est le scénario où l'on construit le plus de logements. Pour autant, ce n'est pas le plus consommateur d'espaces grâce à une part plus importante de logements collectifs.

Jusqu'à où faudrait-il augmenter la densité bâtie pour compenser l'impact d'un volume important de construction neuve ? Toute chose égale par ailleurs (i.e. sans jouer sur d'autres facteurs, notamment la part des maisons individuelles), une densité bâtie de 0,9 (contre 0,15 en 2015) réduirait la consommation d'espace en 2050 pour S3 à un niveau équivalent à S2. Cela correspondrait à une augmentation de la densité parcellaire :

- des maisons individuelles diffuses de 0,540 à 1 (densité parcellaire actuelle de l'habitat en maison de ville) ;
- des logements collectifs à 11. À titre de comparaison, les immeubles haussmanniens, bâtis qui ont la densité la plus importante en France, correspondent à 4,5 [51].

5.4. Secteur transports

Les hypothèses de développement du réseau routier amènent à un niveau de création de nouvelles autoroutes de 720 km au maximum dans S4 et 530 km dans S3 sur la période 2015-2050, des niveaux relativement limités toutefois par rapport aux 11 600 km d'autoroutes françaises en 2015 [30]. Cela conduit à une artificialisation supplémentaire de l'ordre de **2,2 kha au maximum** dans S4 d'ici 2050.

Concernant les routes communales, les estimations mènent à des chiffres compris entre **74 kha** supplémentaires artificialisés dans S1 et jusqu'à **250 kha** dans S4, ce qui en fait une source d'artificialisation majeure, en comparaison des infrastructures rapides (avec un facteur supérieur à 100) et avec les autres sources d'artificialisation quantifiées¹⁷.

Afin de compléter un maillage national d'itinéraires pour le cyclotourisme (véloroutes et voies vertes), le développement des **infrastructures cyclables interurbaines** entraîne la construction d'environ 25 000 km dans S2. Pour une plus grande partie encore dans S1 et surtout S2, il s'agit d'infrastructures interurbaines en parallèle des routes départementales, afin de faciliter la pratique quotidienne du vélo et d'autres véhicules associés y compris dans les zones peu denses, pour un peu plus de 100 000 km pour S2. Au total, cela mène dans S2 à une artificialisation d'un peu plus de **40 kha**.

Concernant le **ferroviaire**, pour les nouvelles LGV, les linéaires se chiffrent généralement en centaines de kilomètres, avec un développement maximal atteignant quasiment 2 000 km de nouvelles lignes

dans S3 entre 2015 et 2050, soit un ordre de grandeur similaire au linéaire présent en 2015 (2 043 km mais augmenté à 2 640 km en 2017 [30]). En prenant une largeur de 15 mètres artificialisés, cela revient à une artificialisation un peu **inférieure à 3 kha**.

Pour le transport **aérien**, les surfaces artificialisées augmentent de 10 % dans S3 par rapport à 2015 et de 15 % pour Tend et S4.

Enfin, pour les **entrepôts logistiques**, l'artificialisation est très contrastée selon les scénarios : réduite à 0 en 2025 et 2035 respectivement dans S1 et S2, elle diminue surtout sur la fin de période pour S3 et augmente temporairement jusqu'à atteindre un niveau maximal autour de 2030 avant de redescendre pour S4.

Le **Graphique 9** combine les différents chiffres évoqués ci-dessus, pour les quatre scénarios et pour le tendancier.

Deux conclusions majeures émergent de l'analyse :

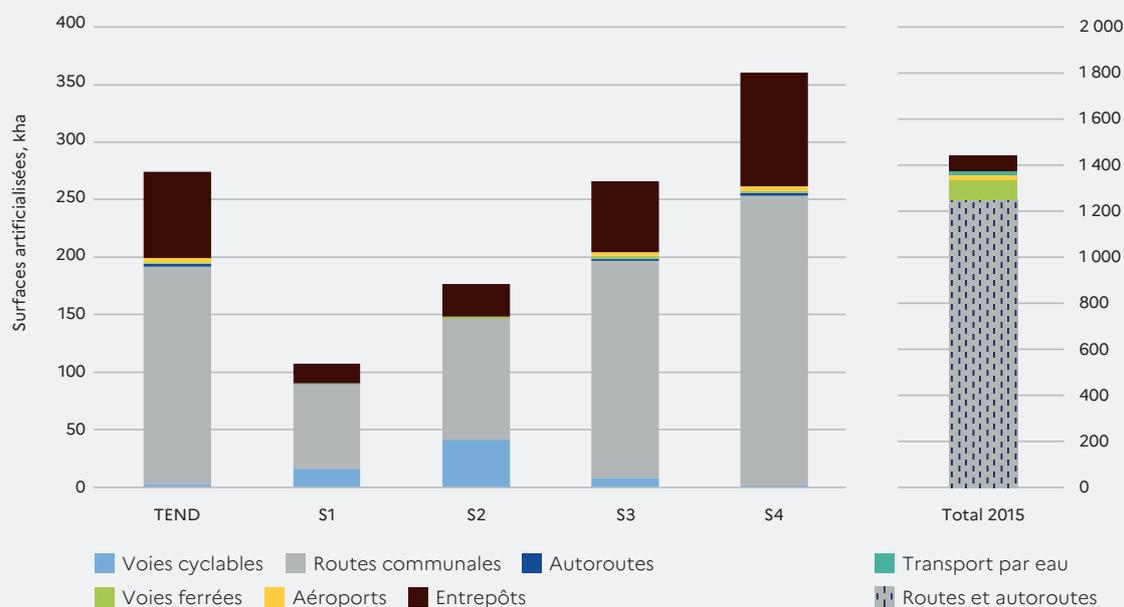
- pour tous les scénarios, c'est l'artificialisation liée aux routes communales qui domine largement (maximum 250 kha), devant les entrepôts logistiques (maximum 100 kha) et les infrastructures cyclables interurbaines (maximum 40 kha), très loin devant les aéroports, les infrastructures ferroviaires et les autoroutes (respectivement 4,0, 2,9 et 2,2 kha au maximum) ;
- l'artificialisation est croissante depuis S1 vers S4, tendance qui se retrouve pour les deux principales sources d'artificialisation, à savoir les routes communales et les entrepôts logistiques.

¹⁷ La largeur des routes retenue est de 10 mètres, trottoirs ou places de parking incluses. Les chiffres en hectares sont donc équivalents au nombre de kilomètres construits, car 1 km x 10 m = 1 ha. Une largeur de 30 mètres est retenue pour les autoroutes, de 4 mètres pour les voies vertes (davantage utilisées pour le cyclotourisme et les loisirs) et de 3 mètres pour les autres infrastructures cyclables interurbaines.

Ainsi l'artificialisation cumulée sur 2015-2050 est 3,4 fois plus élevée dans S4 que S1, avec des surfaces de 107 kha pour S1, 176 pour S2, 266 pour S3 et 361 kha pour S4. L'artificialisation liée aux transports augmente ainsi de 7 à 25 % en 2050,

par rapport au niveau de 2015. La tendance est similaire pour l'imperméabilisation des sols, qui augmente de 95 à 314 kha de S1 à S4, soit une hausse de 7 à 22 % par rapport à 2015.

Graphique 9 Niveaux d'artificialisation en lien avec les nouvelles infrastructures de transport entre 2015 et 2050 selon les scénarios



Note de lecture : TEND/S1/S2/S3/S4 : données en variation à 2050 p/r à la référence 2015 (= artificialisations supplémentaires) (axe de gauche) ; « Total 2015 » : référence 2015 en valeurs absolues (axe de droite).

5.5. Bilan de l'artificialisation des différents secteurs

Le bilan ci-dessous présenté en milliers d'hectares, correspond aux surfaces artificialisées additionnelles par rapport à la situation 2015. Il n'intègre pas les surfaces nécessaires à la production de biomasse énergie (*Graphique 10*).

Dans le chapitre **2.2.1. Production agricole** du rapport Transition(s) 5050, des premières hypothèses avaient été faites sur l'évolution de l'artificialisation dans chacun des scénarios, sur la base des données Teruti-Lucas actuelles. Ces hypothèses ont été intégrées dans les simulations du projet SISAE [36].

Après modélisation dans les différents secteurs artificialisants (urbanisme, transport, EnR...) décrites ci-dessus, on constate que les besoins en artificialisation des sols sont potentiellement plus importants qu'envisagés au départ dans les hypothèses faites sur le secteur agricole. Ces écarts représentent de l'ordre de + 497 kha supplémentaires dans S1, + 124 kha dans S2,

- 62 kha dans S3 et environ - 926 kha dans S4. Ces nouveaux résultats ont plusieurs implications :

- l'écart potentiel d'artificialisation nécessaire entre S1 et S4, qui était d'environ 2 Mha sur la base des hypothèses faites dans le cadre de SISAE, serait réduit à 600 kha sur la base des hypothèses sectorielles affinées ;
- l'évolution des surfaces artificialisées (à la hausse ou à la baisse selon les scénarios) suggère que le potentiel de biomasse et/ou de puits de carbone ont été surestimés ou sous-estimés respectivement. Malheureusement, il n'est actuellement pas possible de croiser correctement les données issues des simulations SISAE et les données d'artificialisation issues des modélisations sectorielles (bâtiment, transports, EnR) ci-dessus. En effet, dans ces dernières, l'artificialisation est considérée comme consommant des ENAF, indépendamment de

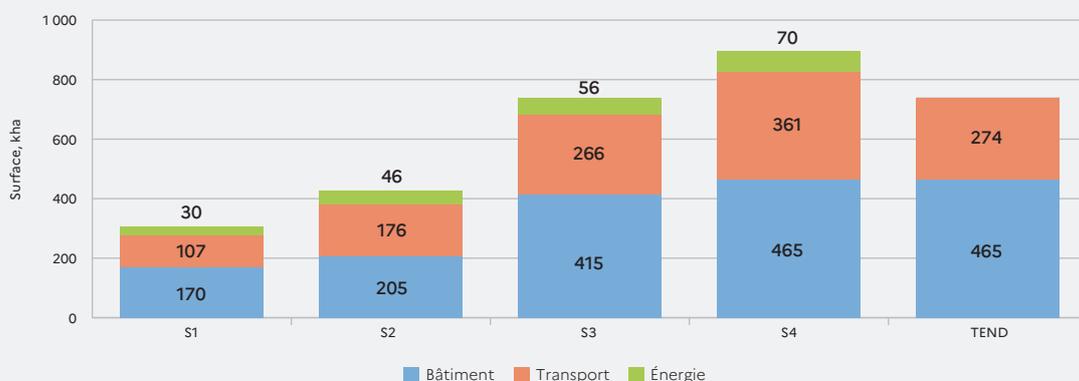
leur type (forêt, terres arables, landes...) alors que des choix de CAS ont été posés dans SISAE. Si l'on fait l'hypothèse que ces surfaces artificialisées sont principalement prises sur le puits de carbone majoritaire de chaque scénario (forêts pour S1, sols agricoles pour S2, forêts et sols agricoles à parts égales pour S3 et S4), on peut estimer que ce puits et le bilan net des émissions, évolueraient selon le **Graphique 10** :

Ces comparaisons doivent tout de même être exploitées avec prudence dans la mesure où chaque

secteur a utilisé une méthode de calcul propre et des bases de données différentes couplées à des modélisations complémentaires. Or, des écarts importants existent dans l'estimation des surfaces artificialisées en fonction des méthodes de mesure (**section 3.2**).

Dans des travaux ultérieurs il serait nécessaire de prévoir, dès les phases amont, une mise en cohérence de ces choix de CAS tant leurs conséquences sur la qualité des sols peut être importante.

Graphique 10 Bilan des surfaces artificialisées additionnelles par rapport à l'année de référence selon les scénarios



N.B. : en 2015, les surfaces artificialisées dans le secteur bâtiment et transport représentaient respectivement 25 kha (sur la base des fichiers fonciers et de modélisations internes) et 1440 kha (données Teruti-Lucas). Les surfaces occupées par des infrastructures d'EnR occupaient environ 5 kha en 2020 (sur la base de retour d'expériences de projets).

Tableau 9 Puits de carbone naturels et bilan net des émissions (MtCO₂eq/an) estimés dans le rapport Transition(s) 2050 et évolution liée aux hypothèses sectorielles affinées dans le feuilleton sols

Puits net (MtCO ₂ eq/an)	2050			
	S1	S2	S3	S4
Puits net (MtCO₂eq/an)				
Transition(s) 2050	116	93	64	41
Feuilleton « Sols »	111	92	64	50
Bilan net (MtCO₂eq/an)				
Transition(s) 2050	- 42	- 28	- 9	1
Feuilleton « Sols »	- 37	- 27	- 9	- 8

6. Limites, recommandations et perspectives

Au-delà des limites identifiées ci-dessous dans les modélisations sectorielles réalisées, il est nécessaire de rappeler que certaines limites sont directement liées au manque de données disponibles et/ou intégrées dès le départ du travail de prospective. À l’instar des enjeux eau et biodiversité, souvent mal évalués, il serait nécessaire d’intégrer dès le début de ce type d’exercice prospectif la question des sols et de leur qualité. Ces sujets étant indispensables à la réussite de la transition écologique, il pourrait être intéressant de rechercher au moins la neutralité d’impact/d’usage sur ces ressources en plus de la neutralité carbone (neutralité d’impact sur les sols, la biodiversité, l’eau...).

6.1. Limites des travaux actuels

PRATIQUES AGRICOLES

Une description plus fine, à l’échelle régionale ou territoriale des pratiques agricoles par scénario permettrait de mettre en cohérence leurs impacts éventuels avec les données de qualité des sols disponibles. Par ailleurs, il serait intéressant d’estimer plus en détail, dans chaque scénario, la capacité des modèles agricoles envisagés à fournir les matières fertilisantes organiques suffisantes permettant de répondre aux besoins de fertilisation. Cette estimation serait à coupler avec une évaluation du risque sanitaire de transfert de métaux lourds (de même dans le cas des fertilisants minéraux). De façon plus générale, une mise en cohérence des changements d’usage des sols (directs et indirects) serait nécessaire pour mieux estimer les impacts sur la qualité et en empreinte.

PRATIQUES SYLVICOLES

Une meilleure différenciation des résultats par pratiques sylvicoles (futaie régulière ou irrégulière, surface des coupes rases, surface de forêt en libre évolution, taux de mécanisation, surface en zone de pente, maintien de bois mort, surface d’exploitation en taillis, surface dédiée à la desserte forestière et aux cloisonnements d’exploitation...) pourrait permettre une analyse plus fine des impacts potentiels sur la qualité des sols, en particulier les risques d’érosion, de tassement, de perte de fertilité et de biodiversité. Par ailleurs, les projections n’intègrent pas les

effets des évolutions des pratiques sylvicoles sur le stockage de carbone dans les sols, le puits dans le sol forestier étant le même dans les différents scénarios indépendamment du mode de gestion. Cela constitue une limite importante car la récolte des menus bois et le travail du sol constituent des éléments de risque de déstockage de carbone dans les sols.

INFRASTRUCTURES DE TRANSPORTS

Les analyses réalisées sur le secteur transports permettent de contraster les différents scénarios sur les principales sources et niveaux d’artificialisation de ce secteur. Cependant, certaines sources d’artificialisation nécessiteraient davantage de travaux, en particulier :

- comptabilisation des voiries, trottoirs, parkings : le périmètre des routes communales catégorisées dans le bilan annuel des transports [33] ne précise pas si les voiries de desserte des constructions (ex. : au sein des lotissements, zones d’activités économiques, etc.), les trottoirs et parkings associés sont comptabilisés ou pas. Comme ils ne le sont pas dans la modélisation de l’artificialisation liée à la construction (source de données « Fichiers fonciers »), il peut y avoir un défaut de comptabilisation. L’exploitation de quelques retours d’expériences d’opérations d’aménagement, en renouvellement ou extension urbains, montre des niveaux d’artificialisation liés à ces voiries, trottoirs, parkings de 33 à 66 % des espaces consacrés au bâti ;
- surfaces de parkings : très peu de données semblent disponibles sur les surfaces dédiées aux parkings, qu’ils soient en voirie (donc potentiellement inclus dans les surfaces des infrastructures routières linéaires) ou sur des places, devant les centres commerciaux, bureaux ou les gares ou encore les besoins d’emplacements supplémentaires à proposer en lien avec le déploiement des Infrastructures de recharge électrique des véhicules Il est donc difficile de savoir quel est l’impact de l’absence de leur prise en compte dans les projections à 2050. En raison de la place accordée à la voiture selon les scénarios, l’évolution de ces surfaces aurait été en baisse dans S1 et S2 et probablement en hausse dans S4 ;

- les infrastructures pour les nouveaux vecteurs énergétiques (bornes de recharge) devraient se développer avec ces nouveaux moyens de transport, sans que cela ne soit possible aujourd’hui d’en estimer l’emprise ;
- logistique et entrepôts : peu de détails sont disponibles à propos de la catégorie des « Stockage, services auxiliaires des transports ». Au vu de la forte dynamique de croissance des entrepôts logistiques ces dernières années et du volume important d’artificialisation estimé à l’horizon 2050 dans certains scénarios, cette source d’artificialisation mériterait des travaux complémentaires à l’avenir.

BÂTIMENT ET AMÉNAGEMENT TERRITORIAL

Les travaux menés avec le CGDD présentent plusieurs limites, qui sont autant de pistes d’approfondissement :

- **type de construction** : dans S1, S2 et S3, on considère que 58 % de la construction se fait en renouvellement urbain (densification ou renouvellement du bâti [30]). Des études complémentaires seraient nécessaires pour étudier la contribution possible des différentes options de renouvellement pour valider le réalisme d’une telle hypothèse (reconquête des espaces ou bâti vacants, potentiellement dégradés et pollués, réhabilitation, changement d’usages, surélévation...). La méconnaissance du gisement potentiel représentés par les friches et anciens sites industriels¹⁸, tant au niveau national que local, est notamment un écueil, auquel la loi Climat et résilience permettra de remédier¹⁹ ;
- **densité bâtie des constructions artificialisantes** : on considère ici que son évolution varie proportionnellement à celle de la densité nette du bâti résidentiel. Il s’agit d’une hypothèse forte qui pourrait faire l’objet d’analyses complémentaires pour s’assurer que cela est réaliste pour les autres types de construction (tertiaire, industriel, équipements publics, etc.) ;
- **densité parcellaire des constructions de 2015** : en l’absence de données pour calibrer la densité parcellaire des constructions actuelles, un travail à dire d’experts a été réalisé. Il est cependant

à affiner dans la mesure où il conditionne l’évolution du taux de densité bâtie. Documenter plus finement les densités parcellaires des constructions par type de construction pour l’habitat et les autres types de construction, serait donc nécessaire pour pouvoir au mieux projeter l’évolution des densités bâties ;

- **surfaces renaturées** : un travail spécifique serait nécessaire pour identifier plus précisément les surfaces qui pourraient faire l’objet d’une renaturation et ainsi valider la capacité des scénarios à atteindre l’objectif ZAN en 2050 de la loi Climat et résilience, en particulier S3 et S4 (*section 6.3*).

6.2. Empreinte sol et changement d’affectation des sols

Les modifications de la demande et des systèmes productifs associés ont des conséquences directes sur les échanges nationaux et mondiaux (et vice versa), mais aussi des conséquences sur les rendements et des impacts sur la pression des sols et les changements d’usages indirects pouvant générer de la déforestation ailleurs, qu’il est difficile à quantifier. Pourtant, les enjeux peuvent être de taille dans un contexte de changement climatique global où la qualité des sols de France et des sols et écosystèmes naturels internationaux tendent à se dégrader. La désertification et la déforestation en cours dans certains pays, la salinisation, l’artificialisation, ou encore la baisse de la fertilité des sols productifs questionnent la durabilité des scénarios d’un point de vue usage des sols et niveaux de production envisageables, qu’il soit alimentaire ou non alimentaire. On peut émettre l’hypothèse que les scénarios alliant davantage de sobriété d’usage, et de réduction du recours à des sols importés permettent potentiellement de réduire ces risques de CAS et CASi, limitent le risque de générer de la déforestation importée, et permettent d’augmenter la résilience des écosystèmes et de fait la faisabilité de ces scénarios. À l’inverse, les scénarios proposant peu d’évolution dans les niveaux de consommation tendent à amplifier ces phénomènes de CAS et CASi au risque de générer des transferts d’impact dans d’autres régions du monde.

¹⁸ Le potentiel foncier issu des activités industrielles et de services sur le territoire des aires urbaines serait de l’ordre de 150 kha, sans préjuger de l’état de vacance ou non des sites concernés (source ADEME).

¹⁹ Art. 205 « observatoires de l’habitat et du foncier », art. 220 « inventaires des zones d’activités économiques »

6.3. Quelle atteinte du ZAN dans les scénarios ?

Comme rappelé en [section 2.1](#), l'objectif ZAN n'a pas été intégré en tant qu'objectif direct à atteindre dans Transition(s)2050, mais a été considéré comme un indicateur de résultat dans chacun des scénarios. En d'autres termes, selon les différentes hypothèses sur l'ensemble des secteurs, chaque scénario présente les conséquences sur l'artificialisation des sols, et la marche à franchir en termes de séquence Éviter, Réduire, Compenser (ERC) pour atteindre le ZAN ([Tableau 10, sections 2.1 et 5.3](#)).

• **Les scénarios se situent très différemment par rapport à la séquence ERC** : dans le cas du Bâtiment, alors que S1 et S2 mettent principalement l'accent, *via* une limitation de la construction, sur « Éviter », S3 et S4, de leur côté, se distinguent par le besoin de recourir massivement à la compensation.

• Par rapport aux objectifs de la loi Climat et résilience, on constate que seuls S1 et S2 permettent d'atteindre une réduction d'artificialisation sur la période 2022-2031 de plus de 50 % par rapport au rythme de la décennie précédente. **Les trajectoires d'atteinte du ZAN sont également très différentes entre scénarios** et l'effort de compensation d'artificialisation nécessaire pour réduire l'artificialisation engendrée par le bâtiment, les infrastructures de transport ou les EnR est très faible pour S1/S2 (respectivement 1,4 kha et 3,5 kha), en comparaison à S3 et S4 (compensation de plus de 19 kha pour S4, soit une superficie d'environ 2 fois la ville de Paris). La question de savoir si les surfaces nécessaires à cette compensation sont bien disponibles reste ouverte ([section 6.1](#)).

Tableau 10 Positionnement des scénarios par rapport aux objectifs de lutte contre l'artificialisation de la loi Climat et résilience et déploiement de la séquence ERC et trajectoire de ZAN associée

	S1	S2	S3	S4
Réduction d'artificialisation sur la période 2022-2031 par rapport au rythme de la décennie précédente	79 %	68 %	37 %	32 %
Compensation nécessaire en 2050 pour atteindre l'objectif ZAN (en milliers d'ha)	1,40	3,52	10,71	19,51
Éviter	++++	+++	0	0
Réduire	++	+++	+	0
Compenser	+	++	+++++	++++
Trajectoires de ZAN	<ul style="list-style-type: none"> • Pas/peu de construction de maisons individuelles. • Étalement urbain extrêmement faible réduisant d'autant les besoins en infrastructures de transport. • La ville se construit sur la ville. • EnR : forte contribution de la méthanisation. • Les espaces naturels sont valorisés et protégés. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas/peu de construction de maisons individuelles. • Étalement urbain extrêmement faible grâce à une coopération territoriale. • Infrastructures de transport accrues par rapport à S1 mais restant moindre que TEND. • La ville se construit sur la ville. • EnR : idem S1 + fort développement du photovoltaïque au sol. • Les espaces naturels sont valorisés et protégés. 	<ul style="list-style-type: none"> • Volume de construction important. • Densité bâtie forte (habitat collectif). • La ville se construit prioritairement sur la ville mais la ville existante ne permet pas d'absorber le volume de construction. • Le développement d'infrastructures de transport est au niveau TEND. • EnR : ~ S2. • Mécanismes de compensation de grande ampleur. 	<ul style="list-style-type: none"> • Volume de construction important. • Faible densité bâtie. • Poursuite de l'étalement urbain sans maîtrise avec un développement d'infrastructures de transport très élevé et > TEND. • EnR : ~ S2 avec recours accru au photovoltaïque au sol. • Mécanismes de compensation de très grande ampleur.

L'analyse comparée des scénarios met en lumière la nécessité de :

- **mieux documenter l'artificialisation** à toutes les échelles (outils de mesures...);
- **promouvoir les stratégies de coopération entre territoires** pour limiter les compétitions urbanistiques visant à attirer de nouveaux habitants ;
- **ouvrir le dialogue sur la nécessité de construire moins, mieux et plus dense.** Modifier les règles d'urbanisme sur la densité, recycler et revitaliser des secteurs déjà artificialisés, communiquer positivement sur la densité et le ZAN [55], évaluer les implications économiques (évolutions des activités de la filière...) et sociales (meilleure répartition des surfaces existantes...);
- **rendre possible la compensation** : identifier les surfaces renaturables, documenter le coût de la compensation (et évaluer l'impact des dispositifs²⁰, fiscaux notamment, permettant de la financer voire en imaginer de nouveaux) et encadrer les pratiques.

Néanmoins, la question de la valeur écologique des espaces est à prendre en compte : Elle sera très probablement moindre, ou du moins différente dans les espaces ayant fait l'objet d'une compensation par rapport à la valeur écologique des sols et écosystèmes détruits par l'artificialisation. Par ailleurs, il faudrait aussi considérer la temporalité des actions (le développement d'un nouvel écosystème prend bien plus de temps que sa destruction).

6.4. Harmoniser les méthodes de mesure de l'artificialisation

Aujourd'hui, 3 méthodes co-existent ([section 3.2](#) et [32]) avec des estimations de surfaces artificialisées variant de 1 à 6. Par ailleurs, la finesse des périmètres considérés dans ces méthodes ne permet pas de bien délimiter certaines sources d'artificialisation et donc de bien caler les approches de modélisation sectorielle. Ainsi, le type de question suivante se pose fréquemment : la source d'artificialisation « X » est-elle comptabilisée *via* telle ou telle méthode, et si oui, dans quel bilan sectoriel est-elle prise en compte ? (Ex. : cas des infrastructures de transport de type dessertes, trottoirs, parkings de lotissements ou zones d'activité [33] [49].) Il en découle des difficultés de confrontation et d'agrégation nécessaire à la production d'un bilan

global dans ce type de travail prospectif. Au-delà de la surface artificialisée, il est également important de suivre les typologies des sols artificialisés car les impacts dépendront des caractéristiques des écosystèmes concernés par l'artificialisation.

Enfin, les changements d'occupation des sols naturels et forêts vers un usage agricole en France ou à l'international ou encore l'intensification des pratiques agricoles ou sylvicoles liés aux développements des usages énergétiques de la biomasse entraîne des impacts sur la qualité des sols et des écosystèmes et le concept d'artificialisation devrait donc s'élargir à l'évaluation de ces impacts.

6.5. Prendre en compte les sols dans le contexte de changement climatique

Les sols ont un rôle central autant dans les processus d'atténuation du changement climatique que dans les solutions d'adaptation à mettre en place. Pour rappel, du fait (1) de l'urgence climatique et que (2) stocker du carbone dans les sols est plus long que déstocker, il est d'abord nécessaire de mettre en place les mesures permettant de limiter au maximum le déstockage de carbone dans les années à venir. Ainsi, il y a urgence à (i) préserver les stocks de carbone dans les sols riches en matière organique (et aussi les stocks et les puits de carbone existants dans la biomasse, notamment forestière) en France et à l'étranger) puis (ii) à stocker davantage de carbone dans les sols (et les arbres) à travers des actions favorisant la qualité des sols et la restauration des écosystèmes dégradés.

Des équilibres sont à trouver dans la production de biomasse énergie (biocarburant, bois énergie, etc.) qui viennent effectivement en substitution d'énergies fossiles mais qui ont tendance à générer des impacts négatifs sur le stockage de carbone dans les écosystèmes. Par exemple, dans les quatre scénarios, les forêts jouent un rôle crucial dans l'atteinte des objectifs de neutralité carbone de la France, à travers (1) la protection et le développement des puits de carbone en favorisant le stockage de carbone dans les écosystèmes et (2) la récolte accrue de bois pour substituer des matériaux et énergies d'origine non renouvelable. Pour favoriser ces différents leviers, il est essentiel d'éviter ou de limiter les défrichements des forêts et de garantir une gestion durable permettant le renouvellement des peuplements après les coupes et le bon fonctionnement de l'écosystème forestier (en lien avec la préservation de la biodiversité et des sols).

²⁰ Comité pour l'économie verte (2019). Les instruments incitatifs pour la maîtrise de l'artificialisation des sols.

Par ailleurs, ces questions de stockage de carbone doivent en plus être couplées aux enjeux plus globaux de qualité des sols. En effet, de façon générale on peut considérer que du fait de l'ensemble des fonctions et services qu'ils rendent, des sols de bonne qualité sont porteurs de solutions à la fois d'atténuation et d'adaptation. Les solutions d'adaptation des différents secteurs (agricoles et forestiers en particulier, mais aussi les réflexions portées sur la nature en ville, la gestion de l'eau et la gestion des espaces naturels) qui promeuvent des solutions fondées sur les sols et la nature sont très souvent favorables à la qualité des sols. Elles les rendent plus résilients face aux conséquences du changement climatique et augmentent le rôle des sols dans l'atténuation (via davantage de stockage de carbone, moins d'émissions de N₂O, une meilleure rétention et filtration des eaux, une biodiversité riche...).

Néanmoins, certaines pratiques visant en particulier à répondre au déficit en eau risqueraient de ne pas être favorables à la qualité des sols, encore moins sous climat futur. C'est par exemple le cas :

- du recours à l'irrigation intensive en agriculture qui pourrait participer à saliniser les sols dans certains cas particuliers. Bien qu'en France ce phénomène demeure encore marginal [56], l'évolution du climat couplée à une intensification de l'irrigation pourrait conduire à amplifier ce phénomène en accumulant les sels en surfaces (par manque de lixiviation dû aux précipitations moins fréquentes), et par remontée capillaire dans les nappes phréatiques dans certains territoires comme les Landes ou l'Hérault²¹ ;
- du développement massif des techniques culturales simplifiées (non-labour, semis direct...) qui pourraient intensifier les phénomènes d'acidification des sols, malgré les co-bénéfices de ces pratiques sur d'autres fonctions des sols ;
- de la transformation des peuplements forestiers en réalisant des plantations monospécifiques d'espèces exotiques avec un travail du sol en plein, qui pourraient être défavorables à la biodiversité des sols (et plus largement des écosystèmes associés).

Par ailleurs, bien que l'impact du changement climatique soit considéré dans Transition(s) 2050 (sur les rendements par exemple), il ne l'est pas sur les sols eux-mêmes (quelle évolution de leur qualité dans le temps sur l'effet du changement climatique ? Quels impacts associés sur les fonctions et services qu'ils fournissent actuellement ?). À l'échelle mondiale, les travaux du

GIEC fournissent des pistes qu'il serait nécessaire d'approfondir plus localement [3]. Entre autres, la modélisation géoprospective en système multi-agents (SMA) permettrait de tester des trajectoires d'artificialisation (par exemple) aux échelles locales. Ce sujet nécessite encore des travaux approfondis afin d'anticiper ces phénomènes et d'identifier les meilleures trajectoires à suivre. Plusieurs questions de recherche ont été identifiées à l'issue de Transition(s) 2050. Par exemple, quelles données et quels modèles seraient nécessaires :

- pour évaluer plus finement le rôle des sols dans l'atténuation du changement climatique ? ;
- pour évaluer les impacts des scénarios sur les sols en France ? à l'étranger ? ;
- pour intégrer l'évolution des sols sous contrainte climatique dans les scénarios ? ;
- pour évaluer les vitesses de régénération des caractères dégradés des sols ? ;
- pour intégrer la temporalité des phénomènes (stockage/déstockage de carbone, etc.) ? ;
- pour mieux intégrer les émissions des autres GES (que le CO₂) par les sols ? ;
- pour mieux intégrer les indicateurs sols des évaluations environnementales (ACV...) ?.

6.6. De l'importance de considérer les écosystèmes associés aux sols

La perte ou dégradation des écosystèmes naturels et des forêts liée à des changements d'occupation des sols ou à l'intensification des pratiques agricoles ou sylvicoles entraîne des impacts sur l'ensemble de l'écosystème associés aux sols (végétation, faune). La protection et la gestion durable des zones humides, cours d'eau, habitat naturel ou des forêts vont au-delà de la protection des sols. Par ailleurs, la biodiversité terrestre (entra autre) est déjà fortement impactée par les activités humaines [5]. Pourtant, protéger les sols durablement est indispensable si l'on veut pouvoir préserver la biodiversité [6]. C'est pourquoi mieux évaluer l'impact de nos scénarios sur la biodiversité et la qualité des écosystèmes dans son ensemble reste un enjeu majeur, qu'il faudrait considérer dans des travaux d'approfondissement ou lors d'un prochain travail de prospective.

²¹ <https://france3-regions.francetvinfo.fr/occitanie/vignes-serignan-meurent-intoxication-au-sel-mer-546726.html>.

6.7. Renforcer le suivi de la qualité des sols, enjeu majeur d'aujourd'hui pour demain

L'ensemble des services rendus par les sols nécessite le maintien d'un « volume de sol » de qualité suffisant, tant en surface qu'en épaisseur [13]. Or, comme présenté en première partie de ce feuilletton, la connaissance et le suivi de la qualité des sols est un élément indispensable à leur gestion durable. L'une des difficultés actuelles étant que l'on manque encore d'outil de quantification des impacts des différentes activités humaines sur la qualité des sols (soit par manque de connaissance et de consensus scientifique, soit par manque de déploiement effectif entre autres)²². Dans ce contexte de pressions croissantes, et de climat changeant, la préservation de la qualité des sols pour leur pleine participation au maintien d'activités humaines durables requiert donc :

- la poursuite de l'acquisition de connaissances sur les indicateurs de qualité des sols ;
- la mise en œuvre à grande échelle de diagnostics approfondis pour évaluer leur état et leur sensibilité (et des cartographies associées), et ainsi identifier les pratiques les plus adaptées au maintien et/ou recouvrement de leur qualité ;
- l'évaluation des coûts environnementaux des pratiques dégradant les sols et les services qu'ils rendent (et des pratiques bénéfiques) pour inciter le déploiement des pratiques bénéfiques²³.

Ce déploiement à grande échelle de diagnostics pourrait passer par l'instauration d'observatoire de la qualité des sols régionaux, à l'image des observatoires des milieux déjà existants (eau, air...), qui viendraient renforcer les actions du GIS SOL à l'échelle nationale. Néanmoins, ces observatoires ont un coût (de déploiement et de fonctionnement sur le long terme) qu'il serait nécessaire d'une part d'estimer et d'autre part d'anticiper par la mise en place dès à présent de fonds dédiés aux sols. Il faut par ailleurs prendre en compte le fait que d'ici 2030, près de 5 Mha seront libérés par des générations d'agriculteurs proches de la retraite [57]. Les réflexions quant aux usages durables de ces sols devraient être menées dès à présent, au regard d'analyses de la qualité de ces sols, et des écosystèmes associés. Enfin, pour garantir la qualité des données, et le déploiement effectif de ces

outils, l'ensemble des actions précédentes doivent en outre être encadrées et accompagnées par des politiques et mesures ambitieuses, à la hauteur des enjeux qui menacent les sols.

6.8. Il y a urgence à protéger les sols

On constate généralement que les délais entre idée, élaboration, mise en place et résultat associés à une réglementation peuvent être relativement longs. Pourtant la temporalité est primordiale car le changement climatique est d'ores et déjà en cours, et l'inertie climatique implique que le climat poursuivra son réchauffement (et les conséquences qui en découlent, en particulier en termes de dégradation des sols et des écosystèmes associés) pour au moins les 15 prochaines années, et ce quelles que soient les décisions et actions prises aujourd'hui. Récemment, la nouvelle stratégie de l'Union européenne pour la protection des sols à l'horizon 2030 a été adoptée en 2021 [58]. Elle vise à parvenir à des sols en bonne santé d'ici à 2050 avec comme élément central la protection, l'utilisation durable et la restauration des sols. Ce texte annonçait en outre que la Commission présenterait, d'ici à 2023, une nouvelle proposition législative sur la santé des sols afin de contribuer à la concrétisation de la vision et des objectifs de cette stratégie, à laquelle devra être adossé un plan d'action. Par ailleurs, au-delà de cette réglementation indispensable pour protéger les sols de chaque territoire, il semble nécessaire d'intégrer plus largement la protection des sols dans les règles d'échanges internationaux tant les enjeux de CAS et CASi sont importants.

L'enjeu est colossal et le sujet complexe ; les politiques d'encadrement et d'accompagnement devront être très ambitieuses pour certaines solutions, et elles poseront des questions socio-économiques (acceptation sociétale ou sociale des mesures, budget public ou coûts privés, etc.). Ces politiques dédiées aux sols devront par ailleurs être mises en cohérences avec l'ensemble des politiques et mesures déjà envisagées sur les autres secteurs liés. Par exemple, comme le rappellent les experts du GIEC, les politiques qui ciblent l'ensemble du système alimentaire (dont la réduction des pertes gaspillage ou cherchant à influencer les choix alimentaires), conduisent à une gestion plus durable des sols.

²² Par exemple du fait des risques identifiés précédemment (artificialisation et érosion en particulier), des indicateurs de perte en sol sont nécessaires pour juger au mieux (localement et à plus large échelle) de leur importance et des moyens de lutte à y consacrer ou pour orienter au mieux le choix des sols à affecter à certains usages en fonction de leurs caractéristiques.

²³ Cette mesure est par ailleurs identifiée par le GIEC.

7. Conclusion

Par les fonctions qui les caractérisent et les services qu'ils rendent à la société, les sols portent notre avenir. Pour autant, de nombreuses pressions continuent à les dégrader de façon parfois irréversible. La gestion durable des sols est au cœur des grands enjeux de la transition écologique et l'absence actuelle de réglementation protégeant de façon transversale cette ressource essentielle (à l'instar de l'eau ou de l'air) illustre la complexité des politiques publiques et sectorielles à mettre en place.

Les sols forment des ressources indispensables pour les transitions sectorielles : comme rappelé ci-dessus, les concurrences d'usage évoluent dans le temps, avec la transition et avec l'amplification des conséquences du changement climatique. Que ce soit sur du foncier public ou du foncier privé, ces concurrences d'usage demanderont donc une orchestration, d'autant plus importante dans les zones à forte concurrence d'usage. C'est par exemple le cas de la recherche de nouvelles terres arables du fait des pressions d'artificialisation (urbanisation, transport...) ou d'une forte augmentation de la demande en biomasse agricole qui vont se faire au détriment des forêts et espaces naturels.

En parallèle, les sols sont l'un des symboles de notre rapport à la nature. Un changement fort de paradigme dans notre relation au monde du vivant est nécessaire pour permettre une transition vers des systèmes plus sobres, valorisant ces sols et fonctionnant davantage en symbiose avec le vivant (pratiques agricoles et sylvicoles plus durables et limitation de l'artificialisation en particulier). Ces choix sociétaux de relation au vivant, et aux sols en particulier, ont des impacts directs sur l'état de ces milieux et des écosystèmes associés et de leur résilience face au changement climatique. Au regard des impacts potentiels en fonction des trajectoires de sociétés envisagées dans les travaux de Transition(s) 2050, on ne peut que constater qu'agir pour préserver les sols et leurs multiples bénéfices doit alors faire partie des priorités absolues dans les années à venir sans oublier de promouvoir la restauration des sols dégradés, d'autant plus qu'il a été montré que le coût de l'inaction dépasse largement le coût de la mise en œuvre de mesures immédiates [59].

« Agir aujourd'hui, c'est donner la possibilité aux générations futures d'agir demain. »

8. Références bibliographiques

Pour revenir à la page contenant la première occurrence du renvoi bibliographique au sein du chapitre, cliquez sur le numéro concerné entre crochets.

- [1] **Calvaruso et al., ADEME**, *Diagnostic de la qualité des sols agricoles et forestiers : indicateurs de suivi et stratégies de déploiement*, 2019, 80 pages.
- [2] **Eglin et al.**, *Contribution aux réflexions sur les concepts de fonctions des sols et de services écosystémiques, et leur évaluation*, Étude et Gestion des Sols, volume 28, 2021, p. 143-146.
- [3] **IPCC**, *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*, 2020.
- [4] <https://www.fao.org/soils-portal/soil-degradation-restoration/global-soil-health-indicators-and-assessment/en/>.
- [5] **FAO, ITPS, GSBI, SCBD, EC**, *State of knowledge of soil biodiversity – Status, challenges and potentialities. Report and Summary for policy makers*, 2020 (<https://www.fao.org/policy-support/tools-and-publications/resources-details/en/c/1363310/>).
- [6] **IPBES**, *The IPBES assessment report on land degradation and restoration. Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*, Bonn, Germany, 2018.
- [7] **Pointereau P., Coulon F., Jiguet F., Aggeliki D., Paracchini M.L., Terres J.M.**, *Les Systèmes agricoles à haute valeur naturelle en France métropolitaine*, Courrier de l'Environnement de l'INRA, n° 59, 2010, p. 3-18.
- [8] **MAP, Secrétariat Général, SCEES**, *Une période favorable de 50 années s'est achevée – Les rendements du blé et du maïs ne progressent plus*, Agreste Primeur n° 210, 2008.
- [9] **Brisson et al.**, *Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France*, *Field Crops Research*, 119, 2010, p. 201-212.
- [10] **MEDDTL/CGDD**, *Le Point sur : l'artificialisation des sols s'opère aux dépens des terres agricoles*, 2011.
- [11] <https://www.ecologie.gouv.fr/artificialisation-des-sols>.
- [12] <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043956924>.
- [13] **GIS SOL**, *L'État des sols de France. Groupement d'intérêt scientifique sur les sols*, 2011, 188 pages.
- [14] **Sénat**, *Vers une alimentation durable : un enjeu sanitaire, social, territorial et environnemental majeur pour la France*, 2020.
- [15] **ADEME, SOGREAH**, *Bilan des flux de contaminants entrant sur les sols agricoles de France métropolitaine, Rapport final*, 2007.
- [16] **ANSES**, *Exposition au cadmium. Propositions de niveaux en cadmium dans les matières fertilisantes et supports de culture permettant de maîtriser la pollution des sols agricoles et la contamination des productions végétales*, Question n° 3, Saisine 2015-SA-0140, Rapport d'expertise collective, Comité d'experts spécialisé « Évaluation des risques physico-chimiques liés aux aliments », 2018, 291 pages.
- [17] **Ruellan**, *Des sols et des hommes, un lien menacé*, IRD éditions, 2010, 106 pages.
- [18] <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2019-01/reperes-chiffres-cles-sols-et-environnement-edition-2015-novembre2016.pdf>.
- [19] **Christel A., Maron P.-A., L. Ranjard L.**, *Méta-analyse sur l'impact des modes de production agricole sur la qualité écologique du sol – Étude et Gestion des Sols*, 29, 2022, p. 117-144.
- [20] **ADEME**, *Les Forêts et les usages du bois*, 2021 (<https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/4647-forets-et-usages-du-bois-dans-l-attenuation-du-changement-climatique-9791029714498.html>).
- [21] **BASOL** (<https://www.georisques.gouv.fr/articles-risques/pollutions-sols-sis-anciens-sites-industriels/basol>).
- [22] *La Reconversion des friches : comment procéder ? Les bonnes questions à se poser*.
- [23] **Makowski et al.**, *Effets environnementaux des changements d'affectation des sols liés à des réorientations agricoles, forestières, ou d'échelle territoriale*, Synthèse du rapport d'étude, INRA (France), 2017, 64 pages.
- [24] https://ec.europa.eu/environment/enveco/resource_efficiency/pdf/FootRev_Report.pdf.
- [25] **O'Brien et al.**, *The land footprint of the EU bioeconomy: Monitoring tools, gaps and needs. Land Use Policy*, 47, 2015, p. 235-246.
- [26] **Agreste**, *L'Occupation du sol entre 1982 et 2018*, Les Dossiers, n° 3, 2021.
- [27] <https://www.gissol.fr/le-gis/programmes/rmq3-34>.
- [28] **GIS SOL**, *L'État des sols de France. Groupement d'intérêt scientifique sur les sols*, 2011, 188 pages.
- [29] <https://artificialisation.developpement-durable.gouv.fr/bases-donnees/teruti-lucas>.

- [30] INSEE, *Caractérisation des espaces consommés par le bâti en France métropolitaine entre 2005 et 2013*, 2017.
- [31] CEREMA, Bocquet M., *L'Artificialisation et ses déterminants d'après les Fichiers fonciers*, 2019a.
- [32] France Stratégie, *Objectifs ZAN, quels leviers pour protéger les sols*, 2019.
- [33] CGDD, *Bilan annuel des transports en 2019*, Données et études statistiques, 2020 (<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/bilan-annuel-des-transports-en-2019-0>).
- [34] Barbier et al., ADEME, *Empreintes sol, énergie et carbone de l'alimentation, Partie 2 : Empreintes des importations agricoles et alimentaires françaises*, 2020, 36 pages.
- [35] ADEME, *Alléger l'empreinte environnementale de la consommation des Français en 2030. Vers une évolution profonde des modes de production et de consommation*, 2015.
- [36] Barbier et al., *Simulation prospective du Système Alimentaire et de son Empreinte carbone (SISAE)*, 2022, 182 pages.
- [37] Roux et al., *Quel rôle pour les forêts et la filière forêt-bois françaises dans l'atténuation du changement climatique ? Une étude des freins et leviers forestiers à l'horizon 2050*, INRA et IGN, 2017, 101 pages.
- [38] ADEME, Ménard et al., *État de l'art analytique et contextualisé – Objectif Zéro artificialisation nette (ZAN) et contribution de l'ADEME : état de l'art, ressources et plan d'actions*, 2021, 136 pages.
- [39] RTE, *Futurs énergétiques 2050 – Chapitre 12 : L'analyse environnementale*, 2022, 142 pages.
- [40] ADEME, *Un mix électrique 100 % renouvelable ? Analyses et optimisations*, 2015, 166 pages.
- [41] ADEME, *État de l'art des impacts des énergies renouvelables sur la biodiversité, les sols et les paysages, et des moyens d'évaluation de ces impacts*, 2019, 201 pages.
- [42] www.photovoltaique.info.
- [43] EUROSERVER, *Baromètres solaire thermique & solaire thermodynamique*, 2021.
- [44] Cycleco, *Analyse du Cycle de Vie de la production d'électricité d'origine éolienne en France*, Rapport final, 2015.
- [45] ADEME (retour d'expérience des centrales du Bassin parisien), 2015.
- [46] Programme Prodiges « Performance des unités de méthanisation » piloté les chambres d'agriculture, Résultats 2022.
- [47] ADEME, données internes agrégées à partir des projets accompagnés par le Fonds Chaleur.
- [48] ADEME, *Récolte durable de bois pour la production de plaquettes forestières*, 2020 (<https://librairie.ademe.fr/produire-autrement/4196-recolte-durable-de-bois-pour-la-production-de-plaquettes-forestieres-9791029714474.html>).
- [49] CGDD, *Trajectoires vers l'objectif « Zéro artificialisation nette »*, Éléments de méthode, 2019.
- [50] CEREMA, Bocquet M., *Mesure de l'artificialisation à l'aide des Fichiers fonciers*, Méthodologie, 2019b.
- [51] IAURIF, *Appréhender la densité : 3. Formes urbaines et densités ; Note rapide sur l'occupation de sols n° 384*, 2005.
- [52] Blanco-Canqui et al., *Implications of Inorganic Fertilization of Irrigated Corn on Soil Properties: Lessons Learned after 50 Years*, *Journal of Environmental quality*, vol. 42, issue 3, 2013, p. 861-871.
- [53] INRA, CNRS, IRSTEA, « Valorisation des matières fertilisantes d'origine résiduaire sur les sols à usage agricole ou forestier : impacts agronomiques, environnementaux, socio-économiques », expertise collective, 2014.
- [54] ADEME, *Analyse de cycle de vie du bois énergie collectif et industriel*, 2022.
- [55] ADEME, I Care & Consult, *Faire la ville dense, durable et désirable*, 2018, 72 pages.
- [56] Wicke et al., *The global technical and economic potential of bioenergy from salt-affected soils*, *En. Env Sci* 4, 2011.
- [57] Terre de Lien, *État des terres agricoles en France*, rapport, 2022, 72 pages.
- [58] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX:52021DC0699>.
- [59] Nkonya et al., *Economics of Land Degradation and Improvement – A Global Assessment for Sustainable Development*, 2016.

FEUILLETON TRANSITION(S) 2050

« **Transition(s) 2050. Choisir maintenant. Agir pour le climat** » est une prospective qui peint quatre chemins cohérents et contrastés pour atteindre la neutralité carbone en France en 2050. Ils visent à articuler les dimensions technico-économiques avec des réflexions sur les transformations de la société qu'elles supposent ou qu'elles suscitent.

Le rapport Transition(s) 2050, première étape de cet exercice, a été publié le 30 novembre 2021. Chaque secteur y est détaillé, à savoir ceux qui relèvent de la consommation, du système productif, de l'offre d'énergie, des ressources et des puits de carbone. Il est complété par des feuillets qui apportent un éclairage supplémentaire, en particulier sur les impacts induits.

C'est l'objet du présent ouvrage qui analyse de façon détaillée les impacts sur les sols des scénarios Transition(s) 2050 liés à l'agriculture, aux forêts, aux énergies renouvelables, aux bâtiments et aux transports.

L'ensemble de ces publications est le résultat d'un travail de deux ans mené par l'ADEME en interaction avec des partenaires extérieurs afin d'éclairer les décisions à prendre dans les années à venir. Car le but n'est pas de proposer un projet politique, ni « la » bonne trajectoire mais de rassembler des éléments de connaissances techniques, économiques et environnementales afin de faire prendre conscience des implications des choix sociétaux et techniques qu'entraîneront les chemins qui seront choisis.



La version numérique de ce document est conforme aux normes d'accessibilité PDF/UA (ISO 14289-1), WCAG 2.1 niveau AA et RGAA 4.1 à l'exception des critères sur les couleurs. Son ergonomie permet aux personnes handicapées motrices de naviguer à travers ce PDF à l'aide de commandes clavier. Accessible aux personnes déficientes visuelles, il a été balisé de façon à être retranscrit vocalement par les lecteurs d'écran, dans son intégralité, et ce à partir de n'importe quel support informatique.

Version e-accessible par  DocAcess

011800

