

# De la Route de 5<sup>e</sup> Génération aux Routes de l'Anthropocène - Quelles synergies entre digitalisation des infrastructures de transport et protection des paysages et de la biodiversité ?

Nicolas Hautière, Directeur du Département COSYS, Université Gustave Eiffel,

Sylvain Moulherat, OïkoLab, TerrOïko et Dorothée Labarraque, Directrice Innovation – SL Environnement – EGIS, France

Illustrations © Auteurs

Le projet « *Route 5e Génération* » ou R5GMD, déclinaison française du projet « *Forever Open Road* », vise à concevoir des infrastructures routières adaptées aux enjeux du 21<sup>e</sup> siècle. Le projet a été découpé en trois phases. La première phase (2010-2015) a été dédiée à l'identification des technologies-clés et à l'élaboration des projets de recherche associés, aboutissant à la publication d'une feuille de route validée par le Ministère chargé de l'environnement et chargé des transports à l'occasion de la COP 21. La deuxième phase (2015-2020) a été consacrée à la réalisation de démonstrateurs de ces technologies-clés. La troisième phase, qui a démarré en 2020, vise au déploiement massif des meilleures solutions issues de ces démonstrateurs. Ce déploiement massif nécessite, soit des financements publics qui, même s'ils sont conséquents, ne permettront de déployer les solutions que de façon incrémentale sur les territoires, soit de concevoir et mettre en œuvre des modèles économiques plus innovants qui, considérant une R5G adossée à de nouvelles fonctions écologiques et climatiques, seront susceptibles d'en accélérer drastiquement le déploiement.



Nicolas Hautière



Sylvain Moulherat



Dorothée Labarraque

Dans ce contexte, cet article présente diverses pistes investiguées actuellement pour répondre aux enjeux de mobilité, de décarbonation

du transport et de protection de la biodiversité vis-à-vis entre autres du changement climatique. Le concept des Routes de l'Anthropocène,

embarqué dans le projet TRÂCE, repose sur une vision de rupture. Il consiste à repenser les dépendances vertes et bleues des infrastructures de transport en termes de corridors écologiques et climatiques adossés aux fonctions énergie-mobilité-numérique de la Route de 5<sup>e</sup> Génération (R5G), où l'on évaluerait la mise en œuvre de bouquets de solutions de géo-ingénierie via des jumeaux numériques.

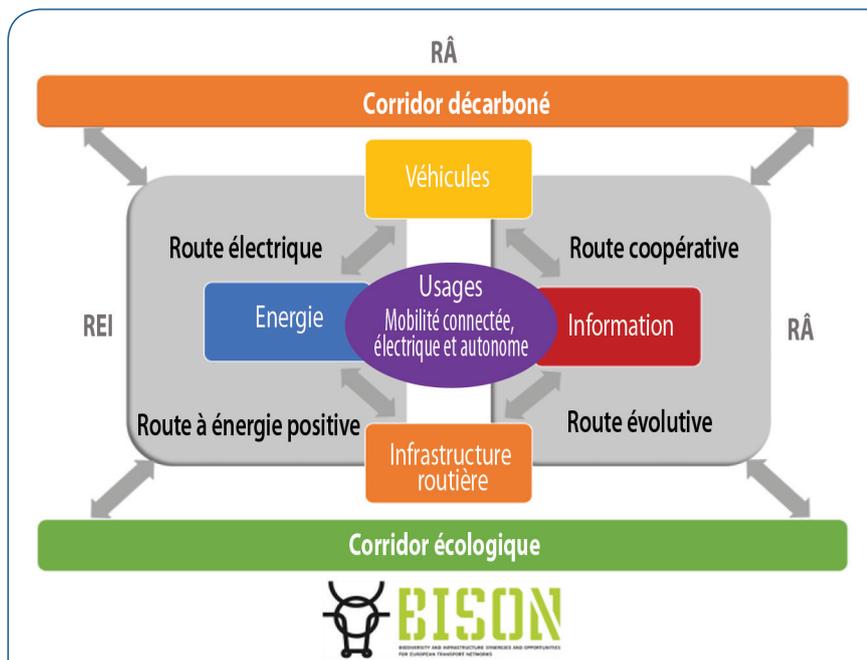


Illustration 1 - De la R5G aux Routes de l'Anthropocène (projet TRÂCE) intégrant les solutions fondées sur la nature et le monitoring environnemental opportuniste

## LES ROUTES DE L'ANTHROPOCÈNE

### Vision

Par une action sur l'infrastructure routière au sens large, on peut à la fois améliorer la mobilité urbaine et interurbaine, améliorer les milieux naturels avoisinants dégradés et lutter contre le bouleversement climatique. Cette vision est alignée avec la proposition portée récemment au

- 1 Repenser et adapter les infrastructures à la robomobilité de façon progressive (électrification & automatisation)
- 2 Contribuer au développement d'un nouveau mix énergétique
- 3 Surveiller les tendances générales sur l'état de la biodiversité et transformer les ILTeX en habitat ou corridor pour la biodiversité
- 4 Capturer, stocker et valoriser le CO<sub>2</sub> sur les ILTeX
- 5 Développer des bioénergies associées au captage et stockage du carbone
- 6 Contribuer à la transition agroécologique
- 7 Développer une économie circulaire de proximité des matériaux décarbonés et biosourcés
- 8 Préserver la ressource en eau et contribuer à sa dépollution
- 9 Observer le territoire de façon opportuniste, surveiller les tendances générales sur l'état de conservation de la biodiversité
- 10 Co-construire une gouvernance locale

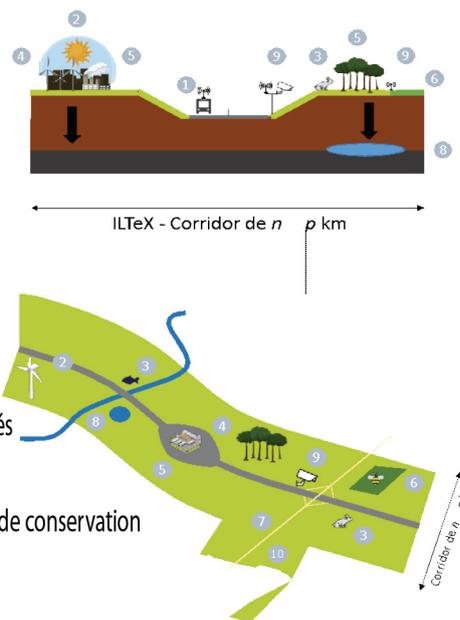


Illustration 2 – Schéma de concept du corridor étendu (ILTeX) où seraient déployés les services associés aux Routes de l'Anthropocène

T20 (groupe d'engagement des think tanks pour le G20) par Buchoud et al. (2020). La contribution systémique aux enjeux sociétaux de cette R5G élargie, incluant les dépendances vertes et bleues, est illustrée sur la *illustration 1*.

La conception des routes devrait ainsi progressivement passer du modèle Véhicule-Infrastructure-Conducteur (VIC) au modèle Véhicule-Infrastructure-Information-Énergie (VIZE). La route électrique, la route coopérative, la route à énergie positive et la route évolutive forment quatre technologies-clés qui accompagnent le développement des nouvelles offres de mobilité connectée, électrique, partagée et automatisée. Grâce à ces technologies transformatives, l'infrastructure routière va pouvoir proposer de nouveaux services, y compris à son environnement proche. La route (infrastructure et véhicule) devient automatisée (RA) et énergétiquement intégrée (REI).

Les dépendances vertes et bleues peuvent être conçues (et en ce sens, faire partie des objectifs fonctionnels de la route) dans le cadre d'une stratégie de développement de la trame verte et bleue d'un territoire pour donner à la faune et à la flore des capacités de déplacement à utiliser selon les évolutions du climat et pour capturer le CO<sub>2</sub>, et ainsi former un corridor à la fois écologique (CE) et climatique (RÂ, en référence à la divinité égyptienne du soleil ou aux Routes de l'Anthropocène, comme l'on voudra).

## Concept

L'idée-force consiste à transformer, en les dimensionnant de façon optimale, les dépendances vertes et bleues dans les emprises jusqu'aux territoires adjacents des infrastructures

de transport (ILTeX) – essentiellement autoroutières et ferroviaires en milieu interurbain – en corridors écologiques et climatiques où l'on met en œuvre des bouquets de solutions de bio et géo-ingénierie. Un tel corridor étendu :

- Constitue un vecteur de biodiversité tout en permettant à la faune et à la flore de se déplacer pour s'adapter au changement climatique en empruntant des itinéraires de migration sans coupure, du Nord au Sud et de l'Est à l'Ouest ;
- Permet de surveiller les tendances générales sur l'état de conservation de la biodiversité à l'aide de réseaux de capteurs (acoustiques, vidéos) ;
- Séquestre massivement du CO<sub>2</sub> atmosphérique, par exemple par reboisement ou par augmentation du carbone organique des sols ;
- Accueille des unités de production de carburants alternatifs à partir de l'énergie ou du CO<sub>2</sub> qu'il capte ;
- Permet de surveiller les cours d'eau, et prévenir les pollutions et accueille des micro-usines de traitement ;
- Produit les bioressources pour entretenir les réseaux routiers proches ;
- Etc.

Il s'agit de développer des synergies opérationnelles entre les fonctions écologiques du corridor et les fonctions techniques de la R5G pour réduire les coûts tout en constituant un ensemble cohérent et lisible. L'infrastructure R5G télécom et les capteurs du système d'exploitation routier ou ferroviaire, servent au monitoring environnemental du corridor : par exemple, les caméras qui équipent les réseaux permettent l'analyse des comportements des animaux, alimentent les systèmes de gestion, y compris du risque de collision entre

animaux et véhicules, surveillent l'état de la flore et commandent des interventions humaines qui le nécessitent en même temps qu'elles mesurent le trafic et la météo. L'énergie électrique et le « *smart grid* » de recharge des véhicules électriques (recharge ponctuelle en station ou recharge en continu), de même que les équipements de production d'énergie décentralisés (route solaire), alimentent les véhicules et les équipements du corridor, y compris les micro-unités de traitement des eaux et de séquestration de CO<sub>2</sub>.

Ce corridor, schématisé en *illustration 2*, est muni de règles spécifiques de gouvernance (à déterminer entre écologues, exploitants de réseaux de transport et gestionnaires du domaine public et propriétaires fonciers privés) suffisamment attractives pour accroître le périmètre du corridor par adhésion progressive des propriétaires des terres concernées.

Il constitue aussi un véritable laboratoire à ciel ouvert en partenariat avec des équipes de chercheurs qui testent des solutions et comparent, dans des analyses de cycle de vie, les différentes stratégies mises en œuvre sur le corridor.

### Vers des contrats globaux de performance plus ambitieux sur le plan environnemental

L'objectif serait de construire d'ambitieux contrats globaux de performance impliquant les États, les collectivités et les exploitants autoroutiers. Le corridor, comprenant les emprises ainsi que les territoires proches (ILTeX) - au sens du « *1 % paysage et développement* » -, serait dimensionné pour assurer la neutralité de son impact sur la biodiversité et compenser l'ensemble des émissions CO<sub>2</sub> résiduelles, entre autres du transport, recensées à une date donnée. Les exploitants et cofinanceurs du corridor seraient financièrement encouragés à réduire les émissions liées au transport par la construction d'une offre industrielle (carburants, matériaux) bas carbone certifiée.

En contrepartie de ces nouveaux contrats « *performantiels* », les exploitants pourraient se voir confier l'adaptation des réseaux urbains et mettre en œuvre des solutions d'adaptation des autoroutes urbaines, comme celles proposées dans le cadre de la consultation internationale sur le devenir des autoroutes du futur du Grand Paris, susceptibles notamment d'impacter de façon positive la santé des habitants. Par la même, il s'agirait de créer un mécanisme solidaire entre ville et campagne aboutissant à un cercle vertueux entre transformation des réseaux autoroutiers urbains, à même de se transformer en boulevards urbains à haute qualité de vie, et interurbains, à même de se transformer en corridors écologiques et climatiques, et ainsi contribuer par une approche nouvelle à la lutte contre l'étalement urbain.

## EXEMPLES DE TRAVAUX DE RECHERCHE RÉCENTS SOUTENUS PAR ITTECOP<sup>1</sup>

### Développer et intégrer des solutions à émissions négatives le long des ILTeX

Les emprises vertes routières constituent un puits de carbone évident. Le projet INFRASOLC a ainsi démontré sur le papier que privilégier certaines espèces végétales et/ou pratiques de gestion, permettant de stocker davantage de CO<sub>2</sub> dans les sols pouvait avoir des bénéfices non négligeables, notamment si l'on élargissait la mesure à une bande de plusieurs centaines de mètres autour des emprises autoroutières existantes. Il reste toutefois à tester en vraie grandeur la solution et à construire un discours permettant de convaincre les parties prenantes, notamment les agriculteurs.

De façon moins mature au plan technologique, les solutions envisagées par certaines start-ups<sup>2</sup> permettent de capturer 100 kt de CO<sub>2</sub> par an y compris foncier et charges d'entretien du corridor écologique, et occupent une surface de moins d'un hectare. Il « *suffirait* » donc en théorie d'installer un bon millier de telles installations le long des infrastructures existantes pour compenser les émissions du transport, soit une installation tous les 10 kilomètres (pour un réseau de 16 000 km).

### Considérer les ILTeX comme un corridor et un habitat pour la biodiversité

Les infrastructures routières ont leur part dans les pressions qui touchent les populations d'abeilles sauvages. Mais dans des contextes environnementaux dégradés, le projet PolLinéaire a montré que les dépendances vertes d'infrastructures de transport peuvent apporter des remèdes à certains maux qui affectent ces insectes. En effet, les DVR constituent par endroits les derniers sites d'accueil de la flore naturelle et des insectes associés. Par conséquent, en développant des corridors écologiques le long des axes de transport qui soient adaptés à différentes espèces de faune et de flore, on développe des supports de biodiversité et par la même on propose des solutions à même de doper la compétitivité des pratiques agroécologiques, secteur lui-même en pleine mutation vers « *l'AgTech* ».

Par ailleurs, la faune sauvage, notamment les grands mammifères comme les sangliers, constituent une source d'accidents non négligeable. Il s'agit donc de mieux détecter et d'alerter les usagers de la route en amont afin de prévenir d'éventuelles collisions, ce que permettent désormais les services développés dans les projets C-ITS. En termes de monitoring, l'enjeu est désormais de multiplier les comptages d'espèces, afin d'alimenter les bases de données de

<sup>1</sup> <https://ittecop.fr/fr/>

<sup>2</sup> Par exemple le canadien Carbon Engineering

façon opportuniste et par la suite de simuler l'évolution des populations animales dans le temps et dans l'espace et ainsi apporter des mesures correctives pendant toute la durée de vie de l'infrastructure.

### Sécuriser le trafic tout en monitorant le changement climatique et la qualité de l'air grâce à l'instrumentation existante sur les ILTeX

La diminution des brouillards en Europe, notamment dus à la réduction de pollution, au cours des 40 dernières années contribue à expliquer un réchauffement climatique plus fort que la moyenne de la planète. En Europe de l'Est, jusqu'à 50 % du réchauffement climatique observé au cours des dernières décennies peut être expliqué de cette manière. En développant des couloirs écologiques et climatiques instrumentés le long des infrastructures de transport, on envisage la mise au point de nouvelles boucles mieux résolues d'observation-prédiction du brouillard, par exemple en exploitant les images des caméras dédiées à gestion du trafic pour l'observation météorologique. Par la suite, en inversant ces modèles, on pourrait chercher à influencer sur les conditions limites (au sol) d'apparition du brouillard et possiblement aménager le corridor en conséquence, en participant par la même à la résolution des enjeux de sécurité routière associés et de circulation des véhicules routiers automatisés par conditions météo dégradées. Le projet IPAVIA suggère ainsi de recenser les occurrences de brouillard afin de constituer un indicateur frustré de qualité de l'air permettant d'évaluer la politique nationale d'amélioration de qualité de l'air, et indirectement de restauration du paysage, à l'image de ce qui est fait par l'EPA américaine dans les grands parcs nationaux.

## LE JUMEAU NUMÉRIQUE, UNE TECHNOLOGIE-CLÉ DES ROUTES DE L'ANTHROPOCÈNE

### Enjeux et opportunités autour du jumeau numérique des infrastructures et des services associés

Même s'il s'agit d'un objet encore peu normalisé, un jumeau numérique est un modèle virtuel d'un objet physique. Il couvre le cycle de vie de l'objet et utilise les données en temps réel envoyées par les capteurs sur l'objet pour simuler le comportement et surveiller les opérations.

On comprend aisément que la constitution d'un jumeau numérique d'une infrastructure routière, ainsi que des solutions associées fondées sur la nature et l'environnement aux abords de l'ILT, allant des emprises aux territoires adjacents (ILTeX), tirant parti des capteurs existants pour son exploitation et de l'infrastructure digitale mise en place pour déployer les nouvelles mobilités, permettraient en théorie de déployer à coût marginal de nouvelles instrumentations pour le monitoring environnemental et d'évaluer par simulation

le bénéfice de nouveaux services. Ainsi, la digitalisation des projets ITTECOP susmentionnés, entre autres, permettrait leur opérationnalisation sur de nouveaux territoires, d'abord virtuellement puis en réel.

En tant qu'outil numérique, le jumeau numérique des routes de l'Anthropocène comporterait les défis usuels liés au numérique, à savoir :

- La constitution de formats d'échanges et une gestion de données massives compatible avec le RGPD ;
- La mise au point d'algorithmes de reconnaissance de forme par traitement de données, voire apprentissage machine ;
- Le développement de nouveaux capteurs communicants peu intrusifs ;
- La mise au point de modèles pour le suivi de paramètres visés par le contrat de performance.

On retrouve aussi tous les défis actuels liés au numérique, à savoir la frugalité des traitements, et la durabilité des composants (capteurs électroniques connectés par exemple) et systèmes constituant le jumeau numérique. Il s'agit en effet d'éviter un éventuel effet rebond des émissions lié au déploiement massif des technologies numériques.

Pour développer ces jumeaux numériques, il faut coordonner les efforts de nombreuses parties prenantes publiques et privées issus de champs disciplinaires variés (ingénierie, génie logiciel, électronique, écologie, etc.). Si la France a pris de l'avance à travers le programme de recherche ITTECOP d'une part et envisage le développement d'un jumeau numérique national d'autre part, il ne s'agit pas de faire cavalier seul. Il faut donc également démultiplier les efforts d'investissement et intéresser notamment la Commission Européenne à travers la préparation d'un agenda de recherche et de déploiement ambitieux, afin de donner davantage de place à la biodiversité dans la suite d'Horizon Europe. C'est tout l'objet du projet BISON. Par ailleurs, comme on ne peut pas tout tester partout, un enjeu majeur parmi d'autres est d'identifier des territoires pilotes variés permettant de collecter des jeux de données, apprendre à un endroit et évaluer ailleurs.

### Illustration à travers le développement d'un jumeau numérique pour la réduction du risque de collisions avec la faune sauvage

Le projet OCAPI financé par la fondation FEREC entre 2020 et 2021, labellisé également par ITTECOP, développe une brique technologique permettant à partir de caméras installées pour la gestion de mesures environnementales d'infrastructure de contrôler l'efficacité de ces mesures tout en réalisant une cartographie du risque de présence des espèces génératrices de collisions. L'objectif à moyen terme étant de pouvoir intégrer au jumeau numérique de l'infrastructure une cartographie du risque de collision en temps réelle susceptible de signaler de manière adaptative le risque de collision aux usagers via une signalisation intelligente

ou directement en informant le véhicule. La réalisation de ce projet nécessite la collaboration d'écologues, éditeurs logiciels, électroniciens et de data scientists. Les développements de ce projet portent aujourd'hui sur :

- La conception et l'industrialisation de capteurs AIoT (intelligence artificielle des objets) très basse consommation pour optimiser les performances énergétiques de traitement des données issues des capteurs et leur transfert vers le jumeau numérique ;
- Le traitement en continu des données issues de ces capteurs intelligents ;
- Le développement des logiciels métiers permettant de s'interfacer avec ou de supporter le jumeau numérique de l'infrastructure

## LES ROUTES DE L'ANTHROPOCÈNE VERS LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE DES TERRITOIRES

Le concept des Routes de l'Anthropocène vise le décloisonnement des projets d'infrastructure et de leur évaluation environnementale. Celui-ci peut s'appuyer en partie sur les technologies et infrastructures numériques en cours de déploiement. Grâce aux jumeaux numériques, il s'agit de passer d'une évaluation environnementale a priori, ponctuelle, à une évaluation continue in itinere, permettant de contribuer de façon substantielle à la transition écologique des territoires. C'est un défi à mener à différentes échelles, du gestionnaire autoroutier local au continent, et de concert entre acteurs publics et privés, y compris les financeurs de la recherche mais aussi des infrastructures elles-mêmes.#