



Modélisation des INformations INteropérables
pour les INfrastructures Durables



bpifrance

GT0.5 - Impact Carbone des Données Numériques

Auteurs / Organismes

Layella ZIYANI [Pilote du GT] (ESTP Paris)
Imane AMMAD (Colas)
Pierre BENNING (Bouygues TP)
Anne DONY (ESTP Paris)
Thierry DOUCERON (Setec)

Maud GUIZOL (Colas)
Jean-Pierre JACQUET (Setec)
Anne-Laure LEVENT (Colas)
Renaud de MONTAIGNAC (Oris)
Koji NEGISHI (Oris)

Relacteur / Organisme

Sylvain GUILLOTEAU (ANDRA)

Thème de rattachement : Observatoire

MINnDs2_GT0.5_impact_carbone_donnees_numeriques_032_2022

LC/22/MINNDS2/176-177-178-179-180

Avril 2023

Site internet : www.minnd.fr

Président : François ROBIDA. Chefs de Projet : Pierre BENNING / Vincent KELLER

Gestion administrative et financière : IREX (www.irex.asso.fr), 9 rue de Berri 75008 PARIS, contact@irex.asso.fr

Ce projet a été soutenu par le Programme d'Investissements d'Avenir

1. RÉSUMÉ / ABSTRACT	3
1.1 Abréviations / Glossaire.....	4
1.2 Mots-clés.....	4
2. CONTEXTE RELATIF À L'IMPACT CARBONE	5
2.1 Contexte général	5
2.2 Objectifs du groupe de travail MINnD GT0.5.....	7
2.3 Considération de l'empreinte carbone des données numériques	8
2.4 Considération de l'empreinte carbone liée aux échanges de données.....	13
3. DÉFINITION DU PÉRIMÈTRE D'ÉTUDE	16
3.1 Analyse du Cycle de Vie	16
3.2 Outils d'ACV dans le secteur de la construction.....	16
3.3 Méthodologie d'ACV dans le secteur de la construction.....	20
3.4 Prise en compte de l'impact carbone des outils numériques.....	27
4. PREMIER CAS D'ÉTUDE : TUNNEL	29
4.1 Projets LI5 Sud T2A / T3A	29
4.2 Résultats et interprétations	40
4.3 Conclusion	41
5. DEUXIÈME CAS D'ÉTUDE : AMÉNAGEMENT URBAIN.....	44
5.1 Projet BHNS de Cayenne.....	44
5.2 Résultats et interprétations	49
5.3 Conclusion	51
6. TROISIÈME CAS D'ÉTUDE : AUTOROUTE	52
6.1 Description du cas autoroutier	52
6.2 Résultats et interprétations	56
6.3 Conclusion	57
7. CONCLUSIONS	59
8. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	61
9. ANNEXES.....	63
9.1 Représentation des données et de leurs dépendances	64
9.2 Exemple d'éco-comparateur - Présentation de SEVE	65
9.3 Tableau récapitulatif des éco-comparateurs – Fonctionnalités, domaines d'application et indicateurs mesurés	69
9.4 Extrait DCE du Grand Paris Express.....	71
I. RÉSUMÉ / ABSTRACT	3
1.1 Abréviations / Glossaire.....	4
1.2 Mots-clés.....	4
2. CONTEXTE RELATIF À L'IMPACT CARBONE	5
2.1 Contexte général	5
2.2 Objectifs du groupe de travail MINnD GT0.5.....	7
2.3 Considération de l'empreinte carbone des données numériques	8
2.4 Considération de l'empreinte carbone liée aux échanges de données.....	13
3. DÉFINITION DU PÉRIMÈTRE D'ÉTUDE	16

3.1	Analyse du Cycle de Vie	16
3.2	Outils d'ACV dans le secteur de la construction.....	16
3.3	Méthodologie d'ACV dans le secteur de la construction.....	20
3.4	Prise en compte de l'impact carbone des outils numériques.....	27
4.	PREMIER CAS D'ÉTUDE : TUNNEL	29
4.1	Projets LI5 Sud T2A / T3A	29
4.2	Résultats et interprétations	40
4.3	Conclusion	41
5.	DEUXIÈME CAS D'ÉTUDE : AMÉNAGEMENT URBAIN.....	44
5.1	Projet BHNS de Cayenne.....	44
5.2	Résultats et interprétations	49
5.3	Conclusion	51
6.	TROISIÈME CAS D'ÉTUDE : AUTOROUTE	52
6.1	Description du cas autoroutier	52
6.2	Résultats et interprétations	56
6.3	Conclusion	57
7.	CONCLUSIONS	59
8.	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	61
9.	ANNEXES.....	63
9.1	Représentation des données et de leurs dépendances	64
9.2	Exemple d'éco-comparateur - Présentation de SEVE.....	65
9.3	Tableau récapitulatif des éco-comparateurs – Fonctionnalités, domaines d'application et indicateurs mesurés.....	69
9.4	Extrait DCE du Grand Paris Express.....	71

I. RÉSUMÉ / ABSTRACT

Résumé

Face à l'urgence climatique, les professionnels de la construction se mobilisent en lançant des actions concrètes de réduction des gaz à effet de serre, le but étant de les diminuer de 40 % d'ici 2030 par rapport aux valeurs de référence de 1990. La transition numérique, notamment l'implémentation du BIM, est l'un des leviers permettant de répondre à cet objectif. Or l'empreinte carbone des émissions liées aux activités numériques de la construction n'est pas souvent prise en compte, seule celle liée au projet d'infrastructure (matériaux, énergies...) est estimée. Ce livrable rassemble les travaux du GT0.5 relatifs à l'évaluation de l'impact carbone pour différents cas d'étude (tunnel, aménagement urbain, autoroute). En particulier, les émissions associées au BIM ont été comparées à celles du numérique et à celles du projet global. Les cas d'étude sélectionnés sont des projets de grande ampleur et recouvrent les différentes phases (conception/construction, exploitation, maintenance). Dans les activités numériques, l'impact lié aux équipements informatiques, au volume de données générées et stockées, aux réseaux, aux serveurs... a été calculé. Une fois les postes d'émission recensés, une calculatrice basée sur les données initiales de facteurs d'impact a été élaborée. Il ressort de notre analyse que le numérique a un impact carbone faible par rapport à celui du projet (< 0,2 %), et ce, quel que soit le cas considéré. La part du BIM dans les émissions de CO₂ est négligeable (< 0,03 %). Ainsi, nous pouvons conclure que les processus numériques doivent contribuer efficacement à la transition écologique, puisque leur impact carbone est négligeable et que leur apport, en termes de simulation, d'optimisation et de suivi sont indéniables. Il convient toutefois d'utiliser les outils de manière « raisonnée », notamment en privilégiant le réemploi des matériels informatiques non obsolètes plutôt que leur remplacement systématique au bout d'une certaine période d'exploitation, en favorisant les plateformes collaboratives, en promouvant le stockage des données sur une seule plateforme...

Abstract

Faced with the climate emergency, construction professionals are mobilizing by launching concrete actions to reduce greenhouse gases; the aim is to decrease them by 40% by 2030, in comparison with the reference values of 1990. The digital transition, in particular the implementation of BIM, is one of the levers to meet this objective. However, the carbon footprint of emissions related to digital construction activities is not often considered, that related to the infrastructure project (materials, energy, etc.) is estimated. This deliverable brings together the work of WG0.5 relating to the assessment of the carbon impact for different case studies (tunnel, urban planning, and motorway). In particular, the emissions associated with BIM were compared to those of digital and the overall project. The case studies selected are large-scale projects and cover the different phases (design/construction, operation, maintenance). In digital activities, the impact related to computer equipment, the volume of data generated and stored, networks, servers, etc. has been calculated. Once the emission items had been identified, a calculator based on the initial impact factor data was built. Our analysis shows that digital technology has a low carbon impact compared to that of the project (< 0.2%), regardless of the case considered. The share of BIM in CO₂ emissions is negligible (< 0.03%). Thus, we can conclude that digital processes must contribute effectively to the ecological transition, since their carbon impact is negligible and their contribution, in terms of simulation, optimization and monitoring, is undeniable. However, the tools should be used in a "reasoned" way, by favoring the reuse of non-obsolete computer equipment rather than their systematic replacement after a certain period of operation, by promoting collaborative platforms, by promoting storage data on a single platform...

I.1 Abréviations / Glossaire

Abréviation	Signification
ACV	Analyse de Cycle de Vie
ADEME	Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
BHNS	Bus à Haut Niveau de Service
CDE	Common Data Environment (Environnement de Données Commun)
COP	Conference Of the Parties (Conférence des Parties)
CPU	Central Processing Unit
DOE	Dossier des Ouvrages Exécutés
EGF.BTP	Entreprises Générales de France - Bâtiment et Travaux Publics
EIR	Exchange Information Requirements
FDES	Fiche de Données Environnementales et Sanitaires
FNTF	Fédération Nationale des Travaux Publics
GES	Gaz à Effet de Serre
GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
GPE	Grand Paris Express
I-BIM	BIM pour les infrastructures
ICV	Inventaire du Cycle de Vie (bilan complet des flux entrants et sortants, des ressources énergétiques, matières premières et transports nécessaires pour fabriquer un produit ou un système)
IDRRIM	Institut des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité
IFC	Industry Foundation Class
IoT	Internet of Things
LOIN	Level Of Information Need
LoRa	Low Range
MOA	Maîtrise d'Ouvrage
NAS	Network Attached Storage
OFCE	Observatoire Français des Conjonctures Économiques
PMS	Pavement Management System
SEVE	Système d'Évaluation de Variantes Environnementales
SGP	Société du Grand Paris
SMI	Site de Maintenance des Infrastructures
t CO ₂ eq	tonne équivalent carbone (masse de dioxyde de carbone qui aurait le même potentiel de réchauffement climatique qu'une quantité donnée d'un autre gaz à effet de serre)

I.2 Mots-clés

Mots clés principaux (Fra)

MINnD ; Recherche ; Construction ; Infrastructures ; BIM ; Maquette numérique

Mots clés spécifiques au livrable (Fra)

Impact carbone ; Empreinte carbone ; Numérique ; BIM ; Tunnel, Aménagement urbain ; Autoroute

Main key words (Eng)

MINnD; Research; Construction; Infrastructure; BIM; Digital model

Deliverable key words (Eng)

Carbon impact; Carbon footprint; Digital; BIM; Tunnel; Urban planning; Motorway

2. CONTEXTE RELATIF À L'IMPACT CARBONE

2.1 Contexte général

Urgence climatique

Sous l'effet des activités industrielles et humaines, les émissions de gaz à effet de serre (GES) n'ont cessé de croître : au niveau mondial, elles sont passées d'environ 16 Gt CO₂eq/an en 1973 (date de la première crise pétrolière) à 38 Gt CO₂eq/an en 2019. Sur la décennie 2010-2019, les émissions annuelles en GES d'origine anthropogénique sont estimées à 56 ± 6 Gt CO₂eq/an et les émissions cumulées nettes en CO₂ de toute origine à 410 ± 30 Gt CO₂eq/an¹. Même si l'année 2020 a marqué un coût d'arrêt de l'économie en raison de la crise de la Covid-19, et par conséquent sur les émissions de GES, diminuant de 5 à 6,5 % par rapport à l'année précédente, le niveau actuel des émissions reste préoccupant. Par ailleurs, les événements récents (canicules, sécheresses, fonte des glaces plus importante dans les pôles...) font rappeler l'urgence de l'instauration par les gouvernements de politiques de réduction du réchauffement climatique, au risque d'observer des conséquences irréversibles sur la biodiversité, les écosystèmes ou les infrastructures.

Des accords au niveau mondial

La COP 21 de 2015 a donné lieu aux accords de Paris sur le climat, scellant les objectifs ambitieux pour tous les pays de « maintenir l'augmentation de la température moyenne mondiale inférieure à 2 °C au-dessus des niveaux préindustriels » et de « poursuivre les efforts d'ici la fin du siècle de limiter l'augmentation de température à 1,5 °C au-dessus des niveaux préindustriels »². La COP 27, présidée à Charm el Cheikh (Égypte) en novembre 2022, a maintenu le cap fixé lors de la COP 21 en termes de limitation des températures. Elle a également débouché sur la création d'un fonds économique pour les pays les plus « vulnérables » qui subissent les dégâts causés par le réchauffement climatique. Elle a incité les états à « accélérer les efforts pour réduire la production électrique liée au charbon » et « supprimer les subventions relatives aux énergies fossiles », sans toutefois imposer d'engagements ; les pays n'étant pas parvenus à un accord³.

Impact carbone de la construction en France

Le domaine de la construction est un des secteurs les plus impactants sur le plan écologique. En effet, selon une étude conduite par Carbone 4 pour le compte de la FNTP en 2018, l'usage des infrastructures représente à lui seul 50 % (soit 325 Mt CO₂eq) des émissions de gaz à effet de serre au niveau français, tandis que la construction des infrastructures génère 3,5 % (soit 22,9 Mt CO₂eq) des émissions. Sur ce dernier pourcentage, 54 % des émissions est lié à l'achat des matières premières (en premier lieu l'acier et le béton conventionnel), et plus de 20 % au carburant des engins de chantier (combustion du gazole et gaz naturel)⁴. Il devient donc urgent pour le secteur de mettre en place des actions concrètes afin de réduire l'empreinte carbone. En 2022, en vue des élections présidentielles, Carbone 4 et l'OFCE ont proposé de faciliter l'usage des énergies décarbonées et le développement du numérique, notamment du BIM, qui doit permettre de réduire l'impact carbone, notamment en optimisant le tracé des infrastructures, en gagnant des quantités de matières lors de travaux de terrassement... L'essor du numérique est

¹ International Panel on Climate Change (GIEC), *Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change*, Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022.

² United Nations, *Framework Convention on Climate Change*, FCCC/CP/2015/10/Add.1, 2016.

³ United Nations, *Framework Convention on Climate Change*, FCCC/CP/2022/10/Add.1, 2023.

⁴ Fédération Nationale des Travaux Publics, *Les Travaux Publics s'engagent pour le climat - Construire les infrastructures autrement : la trajectoire bas carbone des Travaux Publics*, 2021.

d'ailleurs un objectif affiché de la Direction Générale pour le marché intérieur, l'industrie, l'entrepreneuriat et les PME (DG Grow), groupe travaillant au sein de la Commission Européenne⁵.

Ambitions / Enjeux

Au niveau européen

Face à la situation actuelle, les experts du GIEC, dans leur dernier rapport d'évaluation, ont formulé des préconisations, telles que la réduction de 45 % des émissions de CO₂ liées à l'activité humaine entre 2010 et 2030, et l'atteinte de la neutralité carbone en 2050, sur la base d'un seuil d'augmentation de la température moyenne mondiale de 1,5 °C⁶.

À l'échelle de notre continent, la Commission Européenne a mis en place le pacte vert (European Green Deal) en décembre 2019. Elle vise également la neutralité carbone en 2050 et va plus loin que le GIEC, en proposant une baisse des émissions de GES d'au moins 55 % d'ici à 2030, par rapport aux niveaux de référence de 1990. D'autres actions sont visées d'ici à 2030, parmi lesquelles :

- Réduire de 55 % les émissions des voitures ;
- Réduire de 50 % les émissions des utilitaires légers ;
- Potentiellement rénover 35 millions de bâtiments ;
- Créer environ 160 000 emplois « verts » dans le secteur de la construction ;
- Fixer une valeur de référence de 49 % d'énergies renouvelables dans les bâtiments ;
- Obliger les états de l'Union Européenne à augmenter l'utilisation des énergies renouvelables dans le chauffage et le refroidissement de 1,1 point de pourcentage⁷.

Au niveau national

La FNTP, Carbone 4 et le cabinet Utopies ont fixé des objectifs de décarbonation du secteur de la construction, notamment la réduction de 40 % des GES d'ici à 2030, par rapport à 1990. Pour ce faire, plus de 140 propositions et sept leviers d'actions prioritaires (quatre liés à l'énergie et trois aux matériaux), ont été formulés. La FNTP s'est également engagée sur neuf actions, dont l'optimisation, la conception, la réalisation et la maintenance des infrastructures grâce au numérique, en favorisant l'utilisation du BIM.

Acceptabilité / Tolérance

Les objectifs fixés aux niveaux européen et international sont ambitieux et induisent l'implication de chaque citoyen dans la lutte contre le réchauffement climatique. Néanmoins, une récente étude menée par l'OCDE⁸ auprès de plus de 40 000 personnes montre que les sondés n'appuient pas toujours les politiques climatiques. Par exemple, les répondants français sont plutôt favorables à l'instauration de programmes d'infrastructures dites « vertes », à l'accord de subventions en faveur des technologies bas carbone, mais opposés à l'application d'une taxe carbone, sauf si les revenus de celle-ci servent à financer les infrastructures « vertes » ou à réduire l'impôt sur le revenu. Par ailleurs, les personnes interrogées estiment que les politiques climatiques auront un impact négatif sur l'économie et l'emploi, qu'elles coûteront cher aux contribuables et qu'elles profiteront principalement aux classes sociales aisées.

Les auteurs de ce rapport concluent que les citoyens ne sont pas initialement opposés aux politiques climatiques, mais qu'ils ont des doutes sur leur efficacité, leur

⁵ European Commission, *Strategic Plan 2020-2024 - Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and Small and Medium-sized Enterprises (DG Grow)*, Ref. Ares(2020)7470664, 2020.

⁶ International Panel on Climate Change (GIEC), *Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change*, op. cit.

⁷ European Commission, *Strategic Plan 2020-2024 - DG Climate Action*, Ref. Ares(2020)4936136, 2020.

⁸ Organisation for Economic Co-operation and Development, *Fighting climate change: International attitudes toward climate policies*, OECD Economics Department Working Papers No. 1714, 2022.

coût d'application et des craintes sur leur déploiement et leurs effets sur les ménages les plus modestes⁹. Des efforts sont donc à produire pour rassurer la population et démontrer l'intérêt et l'urgence de mener ces politiques.

Mobilisation des acteurs français du secteur de la construction

Les acteurs français de la construction ont entrepris le déploiement de la neutralité carbone en 2050. Ainsi, en janvier 2023, la FNTP, Syntec Ingénierie, MINnD, buildingSMART et EGF.BTP signent conjointement un manifeste appelant à promouvoir l'OpenBIM (cf. 3.4) au service de la transition écologique, à travers trois ambitions :

- Une vision commune, incluant une interopérabilité, accessibilité et fiabilité des données ainsi que leur partage entre les acteurs du projet ;
- Un référentiel partagé : de nombreux travaux de normalisation ont abouti à la publication de documents destinés à organiser les données liées aux objets à construire, notamment par le biais des IFC, à organiser les processus sur les échanges de données et à structurer les données, en particulier de définir les propriétés des objets ;
- Une feuille de route commune.

À ce jour en France, le BIM et les processus numériques ne sont pas imposés ; seules des incitations existent. Quelques MOA (grands donneurs d'ordre) sont demandeurs et initient la démarche, sans pour autant se concerter entre eux.

2.2 Objectifs du groupe de travail MINnD GT0.5

Enjeux

Étant donné le fort impact du secteur des Travaux Publics (acte de construire et usage) sur le bilan carbone de la France¹⁰, les entreprises du secteur se sont engagées à réduire leur empreinte carbone dans une proportion ambitieuse.

La mesure de cette empreinte distingue plusieurs éléments :

- Les matériaux (extraction, fabrication, transport) ;
- La programmation, la concertation, les études, la construction, l'exploitation, la maintenance, la déconstruction des ouvrages ;
- Le numérique pour concevoir, construire, exploiter les ouvrages et stocker les données tout au long du cycle de vie (impact souvent non pris en compte dans les bilans).

Objectif

Dans le cadre du projet national MINnD – saison 2 (2019-2023), aucun groupe de travail ne traite la question de l'impact carbone du numérique, dont du BIM, à part entière. Les aspects environnementaux sont discutés dans les groupes, sans toutefois constituer une étude propre.

L'objectif du groupe de travail « GT0.5 - Impact Carbone des Données Numériques » est de déterminer comment une démarche BIM peut contribuer à :

- Évaluer ou calculer des émissions carbone ;
- Diminuer les émissions carbone (conception, construction, exploitation) ; et cela dans chacun des aspects du projet (matériaux, matériel, transport, mise en œuvre, réemploi).

Verrous principaux

Plusieurs verrous ont été identifiés pour démarrer les réflexions, dont la portée et la complexité n'étaient pas évaluées au démarrage des travaux du GT.

⁹ Ibid.

¹⁰ Jean-Philippe Dupeyron et Valentina Langlois-Salazar, « Les infrastructures au service de la neutralité carbone et de l'adaptation au changement climatique », *Dossiers Economiques*, vol. 169, mai 2021, coll. « Fédération Nationale des Travaux Publics - Territoires & Infrastructures », p. 16-20.

<p>Démarche</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de norme nationale ou internationale sur les méthodes de calcul de l'impact carbone ; • Nombreux outils de calcul (chacun utilise sa propre feuille de calcul !) • Complexité de la définition du scope (Où commence-t-on ? Où s'arrête-t-on ?) • Complexité de la captation des données d'analyse (émissions carbone liées au numérique et au BIM) ; • Nécessité d'une référence (Baseline) pour évaluer les progrès réalisés ; • Nécessité de sensibilisation de tous les acteurs et parties prenantes. <p>Notre démarche a été de monter un groupe de travail représentatif (BIM managers, spécialistes IT, spécialistes logiciels, spécialistes environnementaux, enseignants-chercheurs), puis de définir le cadre de l'étude dans le temps court attribué (12 mois).</p>
<p>Cadre de l'étude</p> <p>Ratio de référence numérique</p> <p>Ratio de référence BIM</p>	<p>Le cadre de notre étude s'est principalement centré sur les aspects suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les outils actuels d'analyse du cycle de vie (ACV) et leurs limites ; • Des cas d'étude représentatifs du secteur des infrastructures pour obtenir des premiers ratios de référence ; • Une méthodologie de travail (collecte des données et « calculatrice » d'évaluation du bilan carbone du numérique) afin de reproduire cette évaluation sur d'autres projets ; • Une analyse des résultats et des recommandations générales ; • Une présentation de sensibilisation pour communiquer nos résultats lors d'une conférence internationale¹¹. <p>Le ratio de référence correspond au pourcentage du bilan carbone du numérique utilisé sur un projet par rapport au bilan carbone total de ce projet.</p> <p>Le bilan carbone du numérique contient les aspects suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Matériel utilisés (ordinateurs, stations de travail, serveurs...) • Infrastructure informatique (connexions et liaisons, routeurs...) • Données échangées entre les acteurs du projet ; • Volume et durée du stockage des données ; • Données captées sur le chantier pour des analyses et prises de décision. <p>Le ratio de référence BIM correspond au pourcentage du bilan carbone du numérique exclusivement utilisé par la démarche BIM sur un projet par rapport au bilan carbone total de ce projet.</p> <p>Le bilan carbone dédié au BIM reprend les mêmes éléments mais avec un filtre sur les matériels des modeleurs (par ex. BIM managers) et contributeurs au BIM, ainsi que les données exclusivement dédiées aux modèles numériques et leurs documents associés.</p>

2.3 Considération de l'empreinte carbone des données numériques

Empreinte carbone des données numériques

¹¹ Layella Ziyani, Pierre Benning, Anne Dony, Jean-Pierre Jacquet, Imane Ammad, Koji Negishi, Thierry Douceron, Maud Guizol, Renaud de Montaignac et Anne-Laure Levent, « Carbon impact of digital tools used in an infrastructure project », InfraBIM Open, Tampere, Finlande, 30 janvier-1er février 2023.

Méthodologie de travail

Le BIM s'appuie par principe sur une grande quantité de données numériques structurées.

Pour visualiser et connaître l'ensemble des impacts carbone que peuvent générer le cycle de vie de ces données, une méthode par questionnaire (comment, quand, etc.) permettant d'approcher une représentation exhaustive de la question sous forme d'un schéma heuristique, a été utilisée. Ce schéma permet d'avoir une vision complète de l'ensemble du système « données ».

Carte de dépendance

Le schéma heuristique a été établi afin de représenter les données et leurs dépendances (cf. Fig 1 et Annexe 9.1).

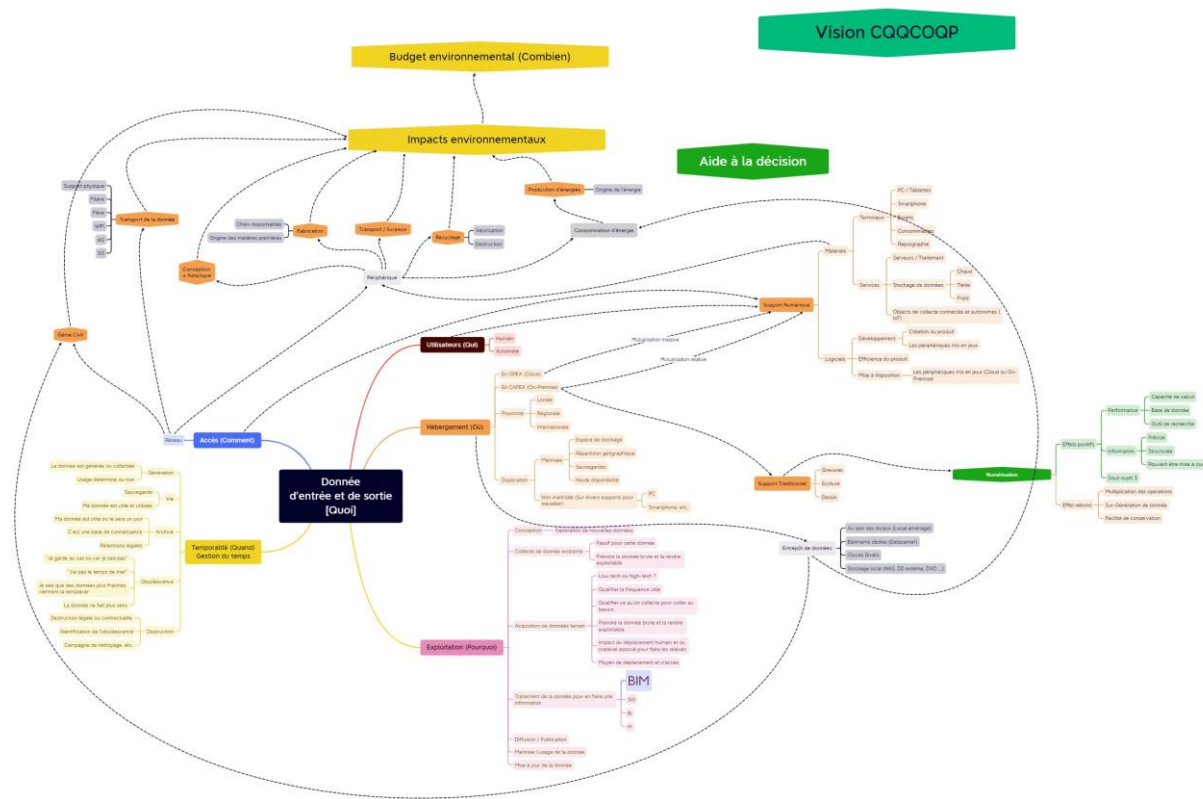


Fig 1. Représentation des données et de leurs dépendances (Voir Annexe 9.1)









Détails des flux de données

En synthèse, le cycle de vie des données numériques et de leurs impacts sont les suivants :

- Elles sont acquises par des moyens manuels (visites sur site, prises de mesures...), des appareils de mesures (scanner, radar, appareils photos, etc.) ou des capteurs autonomes (IoT) installés sur les sites (inclinomètres, accéléromètres, etc.)
- Elles sont transportées du lieu d'acquisition au lieu de stockage: support physique déplacé, réseaux filaires cuivre ou fibre, réseaux sans fil (wifi, LoRa, 4G, 5G, etc.)
- Elles sont stockées, souvent de multiple fois :
 - Support initial comme le papier, mémoires des outils d'acquisitions, souvent conservés pour remonter à la donnée initiale – (obligation Cofrac par exemple) ;
 - Supports intermédiaires (pc, disques externes, clés USB, etc.) ;
 - Supports finaux dans BDD des modèles numériques BIM, soit sur serveurs locaux, soit sur serveurs hébergés au sein de datacenters, soit sur cloud.

- Elles sont traitées par des logiciels : ces logiciels vont permettre d'exploiter les données stockées, de les visualiser, d'en faire des traitements ou calculs à partir d'applications spécialisées, voire d'algorithmes. Les résultats et informations de sortie sont diffusées par différents moyens (éditions papiers, photocopies, sites web, transferts de fichiers, applications smartphone...)
- Elles sont sauvegardées et archivées :
 - La sauvegarde a pour vocation de sécuriser les données (initiales comme les résultats) alors que l'archivage a pour vocation de les conserver sur une période déterminée (courte ou longue, voire indéfinie).
 - Les sauvegardes ou archives peuvent mobiliser des équipements spécialisés actifs (serveurs de backup, NAS) ou passifs (clés USB, disques externes).
 - À noter qu'une partie des sauvegardes et archives peuvent être non maîtrisées du fait des usages utilisateurs qui vont avoir tendance à multiplier les duplications de données ou de résultats. Cette dernière partie est essentiellement source de consommation de matériel et d'équipements et peu d'énergie.

Les sources d'impacts environnementaux tout au long de ce cycle de vie sont les suivantes :

- Transports (véhicules + énergie) 
- Matériel d'acquisition des données (production, fonctionnement, fin de vie)  
- Matériel de communication (production, fonctionnement, fin de vie) 
- Matériel de stockage (production, fonctionnement, fin de vie) 
- Génie civil des bâtiments (datacenters...) et des infrastructures de communication consommations d'énergie 
- Logiciel (production et usages – cpu, espace disque) 
- Supports de diffusion (papier, vidéos, écran, réseaux) 

Quelques repères

Des données quantitatives sur les impacts ont été extraites soit d'études spécifiques, soit de valeurs d'impact issues d'Analyse de Cycle de Vie données par les constructeurs.

L'évaluation de l'empreinte carbone réalisée sur un échantillon de 21 projets BIM étudiés par SETEC (bâtiments industriels) a abouti à une valeur d'émission de CO₂ d'environ **350 kg par année se répartissant de manière équilibrée entre stations, écrans, flux et stockage**. L'évaluation de ces deux derniers éléments comporte cependant un niveau d'incertitude élevé lié aux choix applicatifs et au mode de travail entre la plateforme de stockage et les stations de calculs.

Conclusion

En extrapolant à des projets d'infrastructure, on peut raisonnablement conclure que les impacts pour ce type de grands projets sont de l'ordre de quelques tonnes d'équivalent CO₂ ce qui est très faible au regard des impacts de la construction avec un ordre de grandeur de ratio inférieur à **1 pour 10 000**.

Ex. : la construction d'un bâtiment de 20 000 m² représente l'émission de 24 000 t CO₂eq pour une durée de construction de 4 ans. Les émissions dues à la maquette BIM sur cette durée s'élèvent à 4 x 350 kg, soit 1,4 t rapportées aux 24 000 t de la construction.

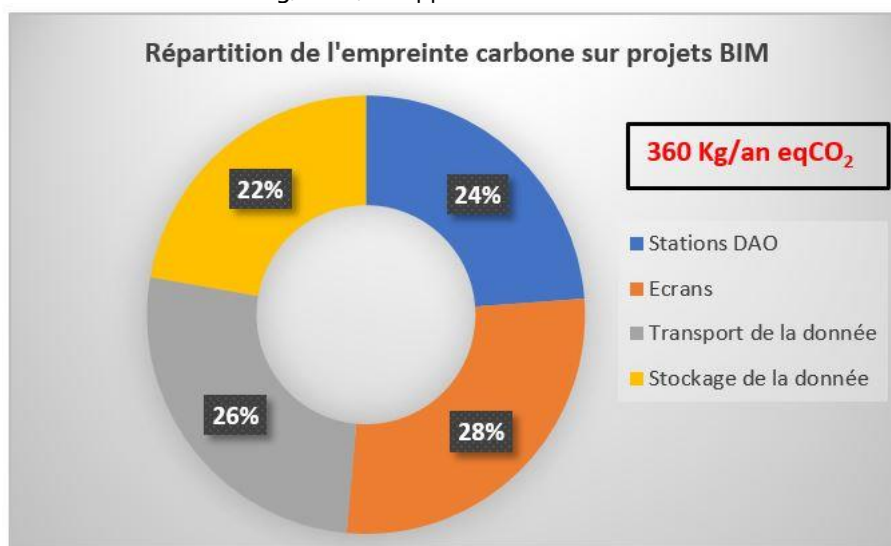


Fig 2. Répartition de l'empreinte carbone sur les projets BIM « Bâtiment ».

Pondération des pavés

Les impacts environnementaux (et en particulier GES) du numérique ont deux origines :

- Le process de fabrication du matériel (depuis l'extraction des matières premières jusqu'à l'acheminement sur les lieux d'usages du produit fini) représente très largement l'impact environnemental le plus important (énergie, raffinement des matières premières, eau...)
- La consommation d'électricité pour le fonctionnement des capteurs (IoT), des réseaux, des serveurs de stockages, des unités de calcul et des terminaux. Cet impact dépend fortement du mode de production de l'électricité. Évidemment, en France, l'impact est très faible hormis pour le stockage sur cloud où la production d'électricité doit être moyennée pour la part réseau et évaluée suivant le fournisseur cloud puisqu'il peut y avoir de grandes variabilités suivant les fournisseurs¹².

Ordre d'impact environnemental

Selon le GreenIt.fr, l'ordre d'impact environnemental est le suivant¹³ :

- Fabrication des équipements utilisateurs ;
- Consommation électrique des équipements utilisateurs ;
- Consommation électrique du réseau ;
- Consommation électrique des centres informatiques ;
- Fabrication des équipements réseau ;
- Fabrication des équipements et des centres informatiques (serveurs, etc.).

Autres impacts environnementaux

Toutefois, il faut prendre en compte d'autres impacts environnementaux que le CO₂ dans le cas des usages numériques et en particulier celui correspondant à l'épuisement des matières premières dont l'ensemble des métaux rares utilisées pour la fabrication des appareils numériques. En effet, les appareils numériques nécessitent un grand nombre d'éléments dont certains sont en disponibilité réduite que ce soit pour des raisons physiques, environnementales, économiques ou géopolitiques.

¹² The Green Web Foundation, *Is your website hosted green? Green Web Checker*, <https://www.thegreenwebfoundation.org/green-web-check/>, consulté le 2 février 2023.

¹³ Frédéric Bordage, *Empreinte environnementale du numérique mondial*, Etude Green.iT, version 2.0, 2019.

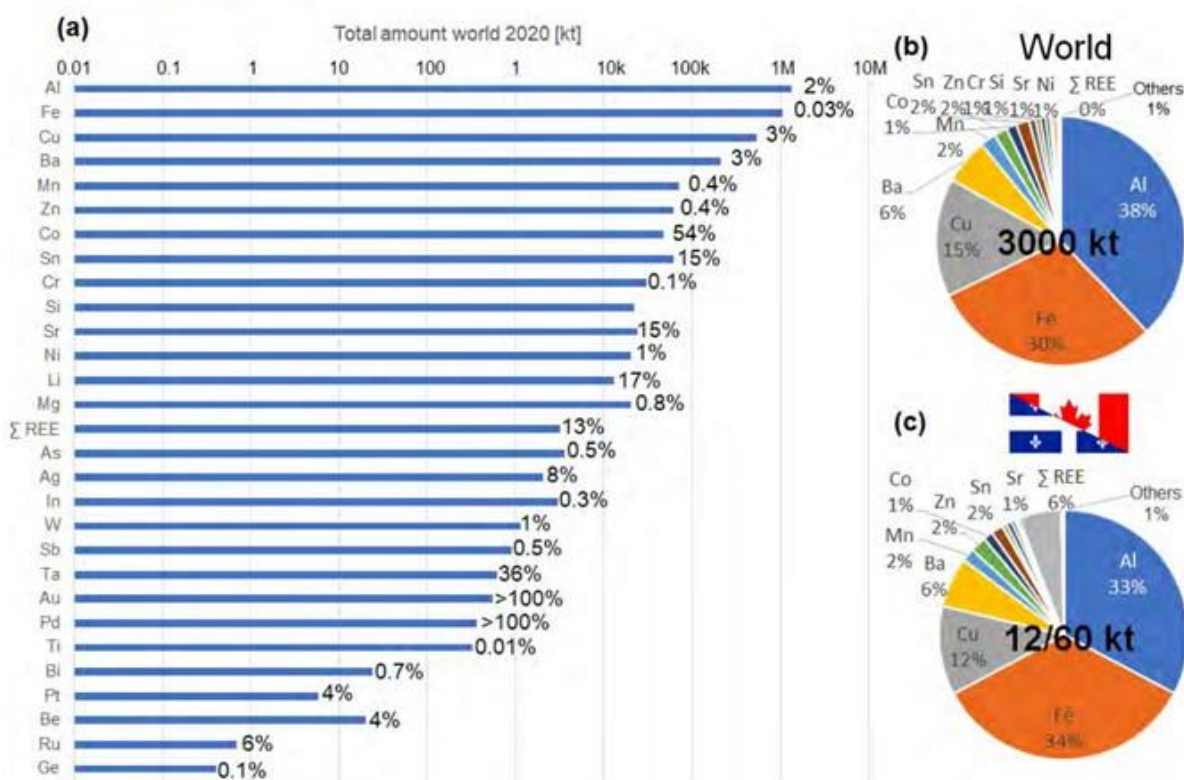


Fig 3. (a) Quantité de matériaux utilisés pour la production des appareils numériques dans le monde (estimations 2020). L'échelle est logarithmique. Les quantités utilisées sont comparées aux quantités de métal extraites de terre en 2020, en % (ce qui ignore les parts recyclées). (Droite) Répartition par métal, (b) au niveau mondial et (c) à l'échelle du Canada et du Québec. Pour l'or et le palladium, l'utilisation importante de parts issues du recyclage fait monter la quantité totale au-dessus de la quantité produite¹⁷.



Fig 4. Résultats de l'impact du Galaxy S6 sur le réchauffement climatique. L'analyse du cycle de vie du Galaxy S6 confirme bien l'impact majeur de la phase de fabrication, et notamment du « pré-manufacturing » qui inclut l'extraction de minerai et de matières premières¹⁸.

L'accroissement des impacts pourra provenir de facteurs comme le déploiement de la 5G, l'accroissement du volume des données (partiellement compensée par les améliorations d'efficacité énergétique ou du mix énergétique) et l'accroissement de la taille des écrans plats (en partie compensée par les limites d'encombrements de bureaux !).

Le surcroît de consommation d'énergie venant de l'IoT en 2025 pourrait être de l'ordre de 200 TWh sans compter l'impact indirect sur la consommation des réseaux et des data centers. Il faut donc se poser des questions sur les formes d'IoT à privilégier, en premier lieu celles qui recèlent un potentiel d'économies d'énergie indirectes¹⁹.

¹⁷ Maxime Pinsard et Julien Toussaint, « L'impact environnemental du numérique au Québec et au Canada », *Shifters Montréal, 2e rapport du projet DiagnosTIC*, 08/2020.

¹⁸ Samsung, *Global Harmony with People, Society & Environment*, Samsung Sustainability report, 2016.

¹⁹ Cigref, The Shift Project, *Sobriété numérique - Une démarche d'entreprise responsable*, 2020.

Sobriété numérique

La sobriété numérique consiste à mettre en place une démarche d'usage raisonné du numérique en prenant en compte les impacts environnementaux de sa mise en œuvre.

Ces impacts environnementaux sont principalement de quatre ordres :

- L'épuisement des ressources naturelles utilisées pour la fabrication du matériel numérique (composants électroniques, capteurs, écrans, câblages, batteries, systèmes de refroidissement, boîtiers...). Depuis 1970, l'extraction a plus que triplé²⁰ ;
- Les dégâts causés à l'environnement, l'énergie et l'eau consommées par les activités d'extraction minières. Ces impacts sont d'autant plus importants que les éléments extraits sont rares et il y a de nombreux éléments rares dans la composition du matériel numérique (voir Fig 3 pour le cas des métaux) ;
- L'énergie consommée durant l'usage du numérique (croissance annuelle de l'ordre de 9 %/an) ;
- La pollution provoquée par les déchets en fin de vie du cycle du matériel. Seuls 1/3 des métaux présents dans les smartphones sont recyclables.

La sobriété numérique permet de limiter ces impacts en travaillant sur la juste adéquation des moyens et des usages (pas de grands écrans lorsque ce n'est pas utile par exemple et plus généralement pas de surdimensionnement), le réemploi et le reconditionnement du matériel qui permet un allongement significatif de sa durée de vie, la gestion de la consommation d'énergie (veille, arrêt dès que possible, etc.).

2.4 Considération de l'empreinte carbone liée aux échanges de données

Échanges de données

Les échanges de données structurées sont un prérequis pour favoriser la trajectoire bas carbone. En effet, cela permet d'assurer :

- La sobriété numérique, puisqu'il s'agit de garantir l'unicité de la donnée (pas de redondance) ;
- L'interopérabilité des données, pour éviter les transformations d'un format dans un autre ;
- L'intégrité de la donnée (fiabilité et responsabilité) dans le but de ne livrer que l'information juste nécessaire pour que chacun puisse exercer correctement ses missions.

DataLake et DataWarehouse

Actuellement, de nombreuses données sont captées et stockées dans des DataLakes. Afin de les analyser et les exploiter, il est nécessaire de les contextualiser, c'est-à-dire de les mettre en cohérence avec d'autres données qui viennent ajouter des informations du contexte de leur captation (par exemple, la température, le matériel de captation...). Afin d'exploiter plus efficacement ces données, il faut donc les nettoyer, les transformer, les structurer et les stocker dans des DataWarehouses.

La plus grande différence entre les DataLakes et les DataWarehouses est sans doute la différence de structure entre les données brutes et les données transformées :

- Les DataLakes stockent généralement des données brutes non transformées ;
- Les DataWarehouses stockent des données transformées et nettoyées.

Norme ISO 19650 :2018

La suite des normes ISO 19650 (Organisation et numérisation des informations relatives aux bâtiments et ouvrages de génie civil, y compris modélisation des informa-

²⁰ The Shift Project, *La résilience des territoires - Pour tenir le cap de la transition écologique*, Tome 1, 2021.

tions de la construction (BIM) - Gestion de l'information par la modélisation des informations de la construction) et en particulier la première partie « Concepts et principes » expose les principes de gestion des données d'un projet de construction²¹.

Ce document fournit des recommandations pour définir un cadre de gestion de l'information incluant l'échange, l'enregistrement, le contrôle de version et l'organisation, à destination de tous les acteurs.

Il s'applique à la totalité du cycle de vie de tout actif bâti, y compris la planification stratégique, la conception initiale, l'ingénierie, le développement, la documentation et la construction, l'exploitation quotidienne, la maintenance, la réhabilitation, la réparation et la fin de vie.

CDE et EIR

Le CDE (Common Data Environment, ou Environnement de Données Commun) propose plusieurs containers d'informations, dont l'EIR (Exchange Information Requirements, c'est-à-dire « Exigences d'Échanges d'Informations ») qui définit les exigences liées aux échanges d'informations du processus BIM.

L'EIR se concentre sur les méthodes à mettre en œuvre pour le partage des données et la génération des documents, en mettant l'accent sur la gestion des contenus d'informations entre les différentes parties prenantes et sur les modalités de vérification, d'archivage et de livraison des modèles. Il s'agit d'un véritable document textuel dans lequel sont identifiés :

- Les aspects réglementaires de référence, priorités et objectifs ;
- Les modèles à mettre en œuvre pour chaque phase de conception avec des niveaux d'information adaptés à l'étape de référence.

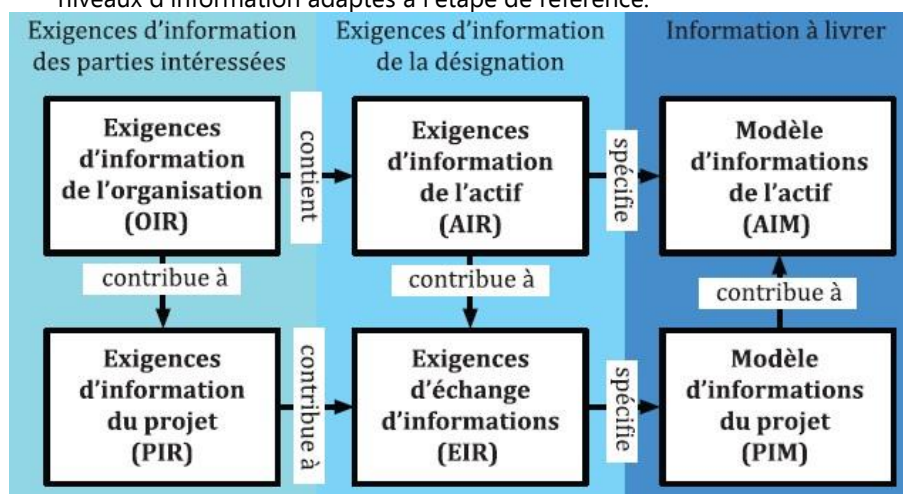


Fig 5. Hiérarchie des exigences d'informations²²

Intérêt de l'EIR

L'EIR est le document le plus opérationnel pour atteindre efficacement les objectifs finaux. Il identifie en détail l'ensemble du flux de travail à suivre, en gérant à l'avance l'ensemble du processus de développement d'un projet. Il est avantageux pour :

- La maîtrise d'ouvrage, car la réalisation de maquettes numériques intégrant des données issues des capteurs, de l'IoT...en temps réel (=jumeaux numériques), réalistes et riches en informations, garantit une vision réelle des projets et permet d'évaluer un certain nombre de facteurs (phases de construction, ressources, coûts et délais, processus de gestion et de maintenance) ;

²¹ NF EN ISO 19650-1, *Organisation et numérisation des informations relatives aux bâtiments et ouvrages de génie civil, y compris modélisation des informations de la construction (BIM) - Gestion de l'information par la modélisation des informations de la construction - Partie 1 : concepts et principes*, Collections AFNOR, 2018.

²² Ibid.

- Les concepteurs et tous les collaborateurs, car grâce à des lignes directrices et des flux de travail clairs définis par l'EIR, ils sont plus productifs, ils réduisent les erreurs, évitent les retards et permettent d'assurer la sobriété numérique.

Usages des données

Norme ISO 17412

En complément de la norme internationale ISO 19650, et afin de mieux décrire l'EIR, d'autres normes décrivent le niveau de besoin d'information (LOIN – Level Of Information Need) dans le cadre des processus d'échange d'informations.

La norme européenne NF EN 17412 (Modélisation des Informations pour la Construction (BIM) - Niveau d'Information Requis - Concepts et Principes), énonce les concepts et les principes permettant de définir le niveau du besoin d'information et les livraisons d'information dans le cadre des processus d'échange d'informations au cours du cycle de vie des actifs bâtis à l'aide de la modélisation des informations de la construction (BIM)²³. Ces concepts et principes peuvent apporter des bénéfices clairs à tous les participants aux différentes phases du cycle de vie des actifs bâtis, car ils permettent une compréhension commune du bon niveau d'information nécessaire à un moment donné, empêchant à la fois une surproduction d'informations coûteuse et une sous-production risquée. L'échange d'informations garantit que les bonnes informations seront livrées pour l'objectif convenu afin de faciliter les processus de vérification et de validation.

On parle donc bien ici de sobriété numérique, d'interopérabilité et d'intégrité, les trois prérequis de base pour assurer un impact carbone maîtrisé des technologies numériques nécessaires à la réalisation d'un projet de construction.

²³ NF EN 17412-1, *Modélisation des informations de la construction - Niveau du besoin d'information - Partie 1 : concepts et principes*, Collections AFNOR, 2020.

3. DÉFINITION DU PÉRIMÈTRE D'ÉTUDE

3.1 Analyse du Cycle de Vie

Définition

L'analyse du cycle de vie (ACV) est une méthode d'évaluation normalisée (NF EN ISO 14040 et 14044) permettant de réaliser un bilan environnemental multicritères et multi-étapes d'un système (produit, service, entreprise ou procédé) sur l'ensemble de son cycle de vie^{24,25}.

Selon la norme ISO 14040 d'octobre 2006, l'ACV « traite les aspects environnementaux et les impacts potentiels tout au long de la vie d'un produit (c'est-à-dire du berceau à la tombe), de l'acquisition de la matière première à sa production, son utilisation et sa disposition ».

Il convient de bien définir le périmètre d'analyse. Dans la construction routière, on parle de notion d'ACV d'un produit, d'un ouvrage, d'un système (quartier/ ville/ réseau autoroutier...).

D'une manière générale, quatre grandes étapes sont recensées :

- Définition de l'objectif et du champ d'étude ;
- Inventaire des cycles de vie (compilation et la quantification des entrants et des sortants) ;
- Évaluation des impacts en choisissant des indicateurs pertinents pour le secteur de la construction ;
- Interprétation des résultats.

Objectif de l'ACV

Selon l'ADEME, l'objectif de l'ACV est de « présenter une vision globale des impacts générés par les produits (biens, services ou procédés), déclinée selon différentes simulations »²⁶.

Dans le domaine de la construction notamment routière, l'ACV vise à fournir des données permettant in fine des choix pour préserver les ressources naturelles et réduire les émissions et déchets ; c'est un outil d'aide à la décision à différents niveaux mais qui doit faire l'objet d'une concertation pour celui qui conçoit (la meilleure technique), pour celui qui achète (le meilleur produit), pour celui qui gère (la meilleure stratégie en fonction de sa politique d'entretien)^{27,28}.

3.2 Outils d'ACV dans le secteur de la construction

Vigilance sur les outils d'ACV

Selon ce même webinaire « L'Analyse du Cycle de vie, outil pour l'écoconception » (février 2022)²⁹, dans le domaine des infrastructures routières, les outils ACV développés ne font pas l'objet spécifiquement d'une homologation mais plutôt de revues critiques et d'un avis communiqué sur le site de l'IDRRIM (<https://www.idrrim.com/>). Tous les outils ne sont pas contrôlés et il convient d'être vigilant.

²⁴ NF EN ISO 14040, *Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes et cadre*, Collections AFNOR, 2006.

²⁵ NF EN ISO 14044, *Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Exigences et lignes directrices*, Collections AFNOR, 2006.

²⁶ ADEME, *Économie circulaire - L'analyse du cycle de vie. Mis à jour le 2 octobre 2018*, <https://expertises.ademe.fr/economie-circulaire/consommer-autrement/passer-a-l'action/dossier/lanalyse-cycle-vie/a-quoi-sert-acv>, consulté le 31 mars 2023.

²⁷ CEREMA, *L'analyse de cycle de vie, un outil pour l'écoconception. Webinaire du 1er février 2022*, <https://www.cerema.fr/fr/actualites/analyse-du-cycle-vie-outil-ecoconception-webinaire-du-1er>, consulté le 31 mars 2023.

²⁸ Rachida Idir, « L'analyse de cycle de vie, un outil pour l'écoconception », Webinaire du CEREMA, 2022.

²⁹ CEREMA, « L'analyse de cycle de vie, un outil pour l'écoconception. Webinaire du 1er février 2022 », *op. cit.*

Spécificités des éco-comparateurs

Ces outils sont en général des éco-comparateurs qui ne réalisent pas en général une ACV complète, notamment avec le focus sur la phase de production des matériaux et de construction. La plupart des outils existants ne prennent pas en compte la phase de service de l'infrastructure ni de fin de vie. Ils sélectionnent en général des critères propres au domaine des infrastructures routières mais ne calculent pas nécessairement les mêmes indicateurs environnementaux avec un champ d'étude variable également. La notion d'éco-comparateur vise à comparer au minimum deux solutions (une solution de base et une solution dite variante qui répondra aux mêmes hypothèses de dimensionnement (trafic, durée de vie...) d'un marché donné.

ECORCE L'outil ECORCE (ECOcomparateur Routes Construction Entretien version V2.0) fait l'objet d'un avis technique délivré en 2013³⁰ et a été développé par l'IFSTAR (désormais Université Gustave Eiffel). Il est présenté comme un éco-comparateur dédié à la comparaison environnementale, pour un chantier de chaussée donné, de solutions techniques et de leur réalisation. Il calcule 11 impacts environnementaux pour une solution technique et une organisation de chantier (matériaux, matériels utilisés) données. La comparaison de diverses solutions est réalisée par l'utilisateur à l'aide de ces résultats. Il permet :

- En phase amont d'un projet, d'évaluer les impacts environnementaux de différentes solutions techniques alternatives ;
- En phase de remise des offres, de proposer des solutions environnementales alternatives (base ou variante) ;
- En phase d'analyse des offres, d'éco-comparer en valeur relative le poids environnemental des différentes solutions techniques proposées par les entreprises ;
- En phase aval de la réalisation de l'ouvrage, de faire un bilan environnemental des travaux exécutés.

Il est précisé d'avoir une bonne connaissance des travaux routiers pour son utilisation.

Les indicateurs retenus sont les émissions de GES (CO₂ équivalent), la consommation énergétique (MJ) (énergie procédé) ; la consommation de matériaux y compris alternatifs (agrégats d'enrobés...) ; la consommation théorique d'eau ; l'acidification ; la toxicité chronique ; la consommation d'eau ; l'écotoxicité ; l'eutrophisation ; l'ozone photochimique.

Cette plateforme précurseur ne fait plus l'objet de mise à jour depuis 2013.

SEVE L'outil SEVE (Système d'Évaluation de Variantes Environnementales) est un éco-comparateur élaboré par la profession routière pour répondre à son engagement pris lors de la signature de la Convention d'Engagement Volontaire du 25 mars 2009 et fait l'objet d'un avis technique délivré également en 2013 dans sa version V2³¹. Il est par ailleurs vérifié par un organisme tiers (Bio by Deloitte). Actuellement, il a évolué vers une version V5. Il permet de comparer l'impact environnemental de chantiers d'infrastructures routières en construction et entretien selon sept indicateurs quantitatifs (la consommation énergétique, les émissions de GES, la tonne kilométrique et la préservation de la ressource (avec les granulats naturels, agrégats d'enrobés valorisés, matériaux recyclés, et déblais)) et deux qualitatifs optionnels (la gestion de l'eau et la prise en compte de la biodiversité), en partant de l'hypothèse d'un même niveau de service et même fonctionnalité. Il couvre les domaines des infrastructures routières, des voiries urbaines, de l'assainissement et des terrassements. Les sources de données sont référencées, publiées et reconnues. Il est possible pour une entreprise ou un organisme utilisant l'outil d'ajouter

³⁰ IDRRIM, ECORCE - ECOcomparateur Routes Construction Entretien V2.0, Avis technique N°158, 2013.

³¹ IDRRIM, SEVE - Système d'Évaluation de Variantes Environnementales V2, Avis technique N°160, 2013.

ses propres produits dans la base de données (« produit entreprise » qui sera identifié spécifiquement dans le bilan environnemental). L'outil est doté d'une interface industrie permettant de regrouper les formulations réelles des installations d'enrobage et une interface bureau d'études. Les nouvelles énergies pour les transports (biodiesel, gaz, biogaz, électrique) sont considérées. Une présentation sommaire des fonctionnalités de la plateforme est disponible dans l'Annexe 9.2.

VARIWAYS

VARIWAYS® est un éco-comparateur développé pour le tracé routier par la société EGIS et fait l'objet de deux avis techniques IDRRIM (159 et 163) en 2013 et 2016^{32,33}. Il va calculer les émissions de gaz à effet de serre (GES) résultant de la phase travaux des différents ouvrages en intégrant la géométrie du projet. Il calcule également la consommation énergétique induite par le trafic routier sur la période d'exploitation de l'infrastructure hors interventions de maintenance et surveillance. Enfin, il propose une évaluation économique des émissions de GES.

Les bases de données utilisées dans Variways reposent sur la méthodologie COPERT (Computer Programme to Calculate Emissions from Road Transport), développée pour l'Agence Européenne de l'Environnement et sont mises à jour régulièrement. L'outil n'est utilisé que par EGIS sous forme de prestations tant pour la France que l'international. Enfin EGIS justifie, dans son avis technique, la considération de la phase d'exploitation en rappelant que selon la profession cette phase est responsable de 80 % des émissions de GES du transport routier.

PERCEVAL

PERCEVAL est un outil développé par CIMBETON et permet d'effectuer une comparaison économique et environnementale sur le cycle de vie complet (phase construction + phase entretien) des chaussées, aménagements routiers et ouvrages annexes. PERCEVAL permet d'effectuer 11 simulations, regroupées en trois domaines (structures routières, ouvrages annexes à la route et valorisation en place des matériaux traités aux liants hydrauliques)³⁴. Il effectue les calculs sur le cycle de vie complet « du berceau jusqu'à la fin de la période de service » pour cinq configurations (construction et entretien), et uniquement construction pour les six autres. L'outil détermine sept indicateurs dont six indicateurs environnementaux (émissions de GES, consommation d'énergie, épuisement des ressources naturelles, consommation d'eau, acidification de l'air, eutrophisation de l'eau) et un indicateur économique (coût global). Pour les calculs environnementaux, les bases de données sont parfaitement définies et diffusées et peuvent être différentes de celles de SEVE ; l'outil sera régulièrement enrichi et optimisé pour prendre en compte d'une part les évolutions réglementaires et normatives et d'autre part pour accompagner les évolutions techniques (en particulier l'utilisation de matériaux recyclés).

ORIS

ORIS, en développement depuis 2016, propose depuis 2022 une plateforme digitale aux différents acteurs dans l'écosystème de l'infrastructure linéaire (ex. route, rail) dotée de multi-services permettant une construction d'infrastructure plus durable avec des solutions optimisées pour chaque environnement d'approvisionnement local. Les utilisateurs sont très variés : fournisseurs de matériaux, constructeur, autorité d'infrastructure, ingénieur, institutions financières, etc. C'est souvent en phase très amont de la construction que le potentiel des réductions des impacts environnementaux est élevé ; or il est difficile de prendre des décisions compte tenu de l'indisponibilité de résultats (difficulté de collecter des données, étude ACV trop chronophage). ORIS propose de réaliser rapidement et de manière transparente une ACV de niveau étendu à travers des projets routiers durables pendant toutes les étapes du cycle de vie. Le cadre d'ORIS permet de combiner une approche d'ACV systématique et complète sur l'ensemble des étapes du cycle de vie :

- Production des matériaux ;

³² IDRRIM, VARIWAYS - L'éco-comparateur de variantes routières V 1.1, Avis technique N°159, 2013.

³³ IDRRIM, VARIWAYS v2.1 (Module Construction), Avis technique N°163, 2016.

³⁴ CIMBéton, PERCEVAL - Eco-comparateur des structures routières, 2022.

- Construction ;
- Exploitation (maintenance, effet albedo, excès de consommation de carburant de véhicule, carbonatation, éclairage) ;
- Fin de vie ;
- Charge et bénéfice liés à la revalorisation des déchets.

L'outil ORIS permet également de faire des comparaisons de plusieurs solutions techniquement équivalentes.

Basé sur le premier niveau d'information d'un projet routier (par ex. localisation, type de route, classification du sol, niveau du trafic estimé) par les utilisateurs, ORIS propose de multiples solutions de structures de chaussées. En général, les catalogues pour les pays intéressés par cette méthode sont élaborés de manière préliminaire en tenant compte d'un nombre limité de données, essentiellement l'intensité du trafic (avec % poids lourds), la qualité des sols de fondation, les conditions climatiques locales, ainsi que le type de chaussée (par ex. souple, semi-rigide, rigide). En combinant ces données de premier niveau, l'épaisseur de chaque couche de la structure proposée est calculée. Les activités de la construction, maintenance, et démantèlement sont associées aux matériaux utilisés dans chaque couche. ORIS met en place une plateforme avec une structuration des données de la base des sites (carrière, centrale d'enrobé) et des matériaux (granulat, enrobé bitumineux) qui sont référencés par ORIS. À ces données des matériaux, les facteurs d'impact carbone (CO₂ équivalent) sont attachés provenant de différentes sources : base Ecoinvent pour des matériaux « standard », extraite de données métiers (ADEME), ICV ou FDES des fournisseurs et finalement via une calculatrice CO₂ intégrée dans la plateforme.

En connectant des bases de données des matériaux géolocalisés, ORIS permet de mesurer, prévoir, optimiser et soutenir une prise de décision rapide en comparant différentes conceptions routières basés sur quatre principaux indicateurs : émissions de GES, coût économique, durabilité et consommation de ressources naturelles locales.

Pour plus de lisibilité, les fonctionnalités, les domaines d'application et les indicateurs mesurés de chaque éco-comparateur sont rassemblés dans un tableau en Annexe 9.3.

Autres outils

Il existe ainsi différents outils dans le secteur de la construction routière qui se basent sur la démarche des normes NF EN ISO14040/14044 mais avec des adaptations métiers et chacun ses spécificités. On peut s'interroger sur la nécessité d'harmoniser un outil commun aux infrastructures routières. Certains sont également développés à l'international tels que SEVE ou ORIS. Actuellement il n'existe, en France, aucune obligation réglementaire, normative ou législative d'utilisation de ces outils.

À l'échelle internationale, il existe différents outils adaptés à leur localité en utilisant des données de pays spécifiques et en prenant en compte des exigences locales. Nous pouvons lister certains d'eux :

- PaLATE : originellement développée en 2003 dans le cadre de consortium de Green Designs and Manufacturing, de l'Université de Californie. Il est basé sur Excel permettant une évaluation environnementale (impact carbone) et économique des activités de production, construction, maintenance et fin de vie de projets routiers aux États-Unis ;
- asPECT : outil de bilan carbone des chaussées en enrobé, développé initialement en 2009 dans le cadre de programmes de recherche financés par Highways England, Mineral product association et Eurobitume en Angleterre ;
- One Click LCA for infrastructure : à la base, c'est un outil international (développé par une entreprise finlandaise) d'aide à la décision de secteur de bâtiment sur toutes les phases du cycle de vie. Grâce à la connexion à de multiples bases de données de la Fiche de Déclaration Environnemental et Sanitaire (FDES), il étend sa capacité d'analyse au secteur d'infrastructures.

Ces outils ne sont développés que pour les infrastructures routières seules mais ne sont pas adaptés à des aménagements urbains ou tunnels, rails...par exemple, pour lesquels il n'existe pas d'outils spécifiques actuellement. Seul ORIS propose certains choix plus larges (rail avec tunnels et ponts, routes).

Conclusion

Le développement de ces plateformes a pour vocation de faciliter l'accès aux données d'impacts environnementaux des matériaux et de tous les intrants nécessaires aux projets afin d'en mesurer leurs impacts et pouvoir travailler sur la réduction voire l'évitement des émissions de GES. Pouvoir effectuer ce travail sans les bases de données, les outils de calculs sur de grands volumes de données et les capacités de présentations et diffusions procurées par ces plateformes est impossible. On illustre par cet inventaire le cas où des outils numériques sont indispensables pour arriver à la baisse des émissions de GES et pour la plupart de ces plateformes, une baisse également d'autres impacts environnementaux. Enfin, il est à noter qu'actuellement aucun de ces outils ne prend en compte l'impact du digital dans le projet de construction.

3.3 Méthodologie d'ACV dans le secteur de la construction

Démarche globale

Ces différents outils ACV dédiés aux projets d'infrastructure routière et le nombre croissant d'articles scientifiques dans le domaine, témoignent des progrès significatifs observés au cours des vingt dernières années et de la mise en place d'une stratégie durable sur l'infrastructure. Parallèlement, de récents travaux de révision ont cependant mis en évidence que la majorité des études publiées présentaient une incohérence au niveau de l'unité fonctionnelle et une limite de système incomplète. Historiquement, seules les opérations de construction et de maintenance ont été prises en compte, alors que la prise en compte des autres phases du cycle de vie (phase d'exploitation, fin de vie) aurait un potentiel des impacts non négligeable pour une prise de décision.

Une fois programmé, un projet de construction est constitué de plusieurs parties opérationnelles, diverses et variées, s'étendant du terrassement à la construction de ponts, de tunnels, et de bâtiment de support technique en passant par la construction de l'infrastructure et la fourniture d'installations (par ex. système de drainage, bandes d'arrêt d'urgence) et d'équipements auxiliaires (poteaux d'éclairage, câbles électriques, séparateur de trafic). Il est important de définir le périmètre global d'un système à évaluer pour que des résultats soient comparables entre des solutions alternatives.

L'objectif de ce chapitre est donc de présenter une méthodologie d'ACV afin de quantifier la performance environnementale de projet d'infrastructure durant les différentes phases de cycle de vie. Pour cela, ce chapitre visera d'abord à lister des éléments à inclure dans le système d'infrastructure pour lesquels le calcul de l'inventaire du cycle de vie sera effectué. Cette méthodologie examinera les phases classiques qui sont considérées par les outils cités précédemment mais indiquera pour chacune la place du digital (acquisition, transport, échanges, stockage, archivage... de données) et pourra ainsi être appliquée à des cas d'étude pour une optimisation de la conception d'infrastructure en réduisant l'impact carbone sur tout le long du cycle de vie d'une route.

Selon la norme européenne de l'ACV NF EN 15804 +A2³⁵, les étapes du cycle de vie et modules pour l'évaluation des ouvrages de construction sont définis dans la Fig 6 et dans la suite du document.

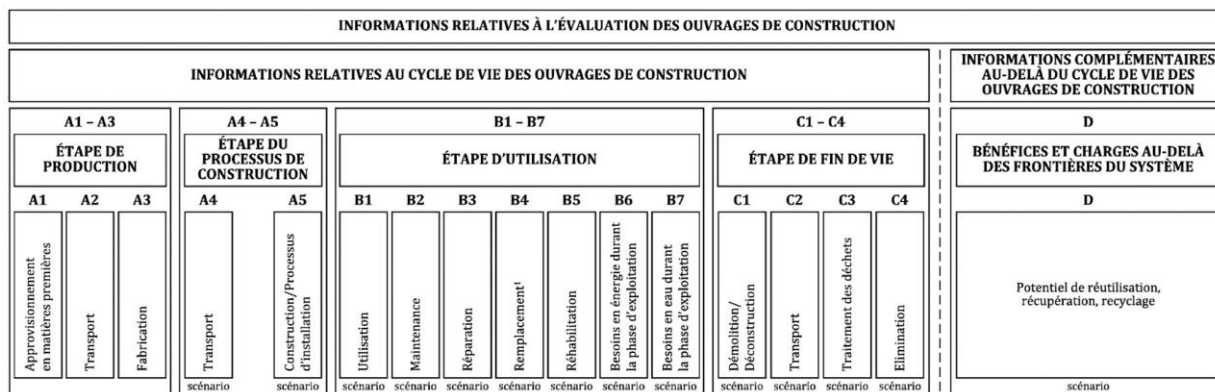


Fig 6. Étapes du cycle de vie et modules pour l'évaluation des ouvrages de construction³⁶

Phase de conception

Cette première phase n'est pas prise en compte dans l'évaluation environnementale d'un projet de construction selon le schéma précédent. Elle consiste à définir les caractéristiques, dimensions, implantation topographique, spécifications techniques du projet routier ainsi que son aspect financier (bonne adéquation entre le coût estimé et le budget alloué) pour permettre ensuite de faire un appel d'offre éventuel. Des études préalables peuvent être nécessaires pour constituer le dossier de consultation aux entreprises.

Il est à noter que cette phase de conception est toujours précédée également d'une phase de programmation qui peut être plus ou moins longue selon la complexité du projet, et qui demande différentes actions telles que des études d'opportunité (réflexion sur l'aménagement routier avec l'itinéraire, choix d'aménagement...), des études d'impact sur l'environnement et santé publique³⁷.

Au niveau de l'analyse du cycle de vie, ces deux premières phases ne sont pas considérées en général dans les ACV classiquement réalisées. Elles sont constituées de collecte d'informations, d'échanges, de réunions... sans aspect opérationnel réel (si ce n'est quelques analyses préalables de sol ou de levés topographiques ?). Ces deux phases font intervenir un certain nombre d'acteurs qui vont ainsi échanger entre eux des informations, constituer des dossiers qui seront stockés pour le projet. C'est pourquoi leur prise en compte ne doit pas être négligée dans le cadre d'une ACV avec impact du digital.

En effet, le travail durant ces deux phases s'appuie essentiellement sur des outils numériques sous les formes suivantes :

- Consultations des documents, plans, archives numériques ;
- Visioconférences ;
- Rédactions de documents tels que présentations, rapports, tableaux de calculs ;
- Traitements d'images, de nuages de points ;
- Vidéos ;

³⁵ NF EN 15804+A2, Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Déclarations environnementales sur les produits - Règles régissant les catégories de produits de construction, Collections AFNOR, 2019.

³⁶ Ibid.

³⁷ Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires - Ministère de la Transition énergétique, Cheminement d'un grand projet routier réalisé en maîtrise d'ouvrage publique, 2022.

- Réalité augmentée et réalité virtuelle.

La quantification de l'impact numérique peut être approchée simplement par quelques critères relativement faciles à obtenir :

Effectifs intervenant sur ces phases exprimés en équivalents temps pleins.années x (valeur d'impact moyen d'un ordinateur avec écran + valeur d'impact d'usage des outils cloud type office 365 + valeur d'impact moyen d'un smartphone) x (1 + coefficient de majoration pour la prise en compte des infrastructures nécessaires au fonctionnement des organisations) + volume de stockage.années des données du projet x (valeur d'impact moyen du stockage + valeur d'impact moyen du flux de circulation des données x nombre moyen de circulation des données).

Pour 1 ETP.an, on peut approcher la valeur moyenne à :

- Ordinateur : 105 kg CO₂eq/an ;
- Écran : 65 kg CO₂eq/an ;
- Smartphone : 20 kg CO₂eq/an ;
- Outils cloud : 250 kg CO₂eq/an ;
- Coefficient de majoration : 50 % ;
- Go stocké : 0,4 kg CO₂eq/an ;
- Go circulant : 0,022 kg CO₂eq/an ;
- Nombre moyen de circulations : 5.

Exemple : pour 1 projet ayant mobilisé 25 ETP.année (5 personnes à temps plein durant 5 ans) et 500 Go de données, nous pouvons évaluer l'impact numérique à $660 \times 25 + 1000 + 275 = 17\,775$ kg CO₂eq que nous pouvons arrondir à 20 t. Si cette phase d'étude intègre une approche environnementale permettant d'aboutir à des réductions d'émissions de GES ou encore mieux (et même plus probablement à ces stades) à des émissions évitées, l'impact numérique sera largement amorti. En effet, un projet d'infrastructure sur l'ensemble de son cycle de vie s'évalue à plusieurs milliers de tonnes *a minima*.

Phase de production

Cette phase est beaucoup plus opérationnelle et elle inclut tous les processus liés notamment aux trois éléments suivants :

- A1 : extraction et traitement des matières premières ;
- A2 : transport des matières premières à un site de production des produits finis ;
- A3 : transformation des matières premières en produits finis (granulat, enrobé, béton...).

Les flux des matériaux et énergies, ainsi que ceux d'émission seront quantifiés pour l'ensemble des produits utilisés dans un projet d'infrastructure. Le dimensionnement d'infrastructures (longueur, largeur, épaisseur) et la densité des matériaux seront la clé pour la quantification de ces flux. Ces flux sont ensuite transformés en impacts environnementaux (par ex. émissions de GES en kgCO₂eq) à l'aide de facteurs de caractérisation d'une méthode de l'évaluation d'impact du cycle de vie (par ex. méthode du GIEC).

Il conviendra de s'interroger des données générées, échangées, transmises, stockées et archivées dans le cadre d'un projet routier.

Phase de construction

La phase de construction inclut les éléments suivants :

- A4 : transport des matériaux à un site de construction ;

- A5 : activité de la construction d'infrastructures.

La phase de construction A5 peut inclure non seulement i) la consommation de carburant utilisée par des équipements de construction, mais aussi ii) le traitement des pertes de matériaux lors de la construction, iii) la production additionnelle et iv) le transport des matériaux pour compenser des pertes, v) le transport des déchets générés lors de la construction vers un site de déposition ou traitement.

Pour un projet de rénovation routière, cette phase doit également considérer toutes les activités et des flux associés à la déconstruction des routes existantes en amont de la nouvelle construction. L'inventaire du cycle de vie de la phase de déconstruction est calculé en additionnant les inventaires respectifs des activités de déconstruction et du traitement des déchets qui en résultent.

Le scénario de fin de vie des déchets générés dans l'ensemble de la phase A5 permettra de définir des procédés.

Phase d'exploitation et de maintenance

La phase d'exploitation de la route pourra se composer des modules suivants :

- B1 : effet de carbonatation par la surface en béton et effet d'albédo³⁸ lié au forçage radiatif³⁹ évité ou augmenté dû au changement de surface de la route ;
- B2-5 : activité liée à la maintenance, réparation, remplacement, et réhabilitation. En particulier, ce module inclut (i) la consommation de carburant et émissions associées à l'usage des engins pour les activités de maintenance (par ex. scellement de joint, fraisage de surface, meulage), (ii) transport des déchets générés, (iii) la production des matériaux de remplacement (y compris tous les procédés des extractions de matières premières et transport à un site de production), (iv) transport des matériaux de remplacement à un site de construction, (v) la consommation de carburant et émissions associées à l'usage des engins pour la reconstruction ;
- B6 : consommation d'énergie liée à l'usage de la route. Il y a deux types de consommation : i) consommation d'électricité due à l'éclairage sur la route et ii) consommation augmentée de carburant de véhicule due à l'interaction entre chaussée et véhicule. Elle prend en compte non seulement les caractéristiques mécaniques et le vieillissement de la chaussée mais aussi l'évolution du trafic journalier sur toute la durée de vie de la route. Le module B2-5 a donc un effet sur le calcul du module B6.

Phase de démantèlement

L'inventaire du cycle de vie de la phase de démantèlement est calculé en additionnant les inventaires respectifs des activités de déconstruction et du traitement des déchets qui en résultent. Elle se compose de quatre procédés principaux :

- C1 : consommation de carburant et émission associés à l'usage des engins pour l'activité de la déconstruction. Cette étape est liée à la définition des paramètres clés pour le scénario de fin de vie de la route, notamment en dépendant de type de la route (i.e. flexible, rigide), de type d'opération de déconstruction (épaisseur de déconstruction) ;

³⁸ Phénomène physique correspondant au réfléchissement depuis un corps de l'énergie solaire qu'il reçoit. Source : CEA, *Qu'est-ce que l'effet d'albedo ?* 28 octobre 2015, <https://www.cea.fr/multimedia/Pages/videos/culture-scientifique/climat-environnement/webdoc-climat/qu-est-ce-que-l-effet-d-albedo.aspx>, consulté le 31 mars 2023., consulté le 31 mars 2023

³⁹ Phénomène de perturbation de l'équilibre d'un système climatique par des facteurs externes au climat proprement dit. Cette perturbation concerne le différentiel entre les énergies radiatives reçues et émises par ce système climatique. Source : Youmatter, *Forçage radiatif : définition, origines et impact sur le climat*. Mis à jour le 5 juin 2020, <https://youmatter.world/fr/definition/forcage-radiatif-definition-origines-impact-sur-le-climat/>, consulté le 31 mars 2023.

- C2 : transport des déchets générés par la déconstruction vers un site de traitement ou dépôt des déchets ;
- C3 : traitement des déchets jusqu'à ce que des déchets atteignent leur statut de fin de déchets. Le statut de fin de déchets est défini selon la norme d'ACV ;
- C4 : dépôts des déchets, les émissions liées à l'enfouissement sont considérées dans cette phase.

Dans toutes ces phases, l'ACV classique mais également les outils présentés précédemment ne considèrent pas en général l'impact du digital. Il conviendra de s'interroger, pour chaque phase, des outils numériques utilisés (du smartphone au cloud) des données générées, échangées, transmises, stockées et archivées dans le cadre d'un projet routier.

Phase de récupération/ réutilisation / recyclage

Le module d'informations D, qui est optionnel, permet au fabricant de déclarer les charges et bénéfiques potentiels « au-delà des frontières du système » engendrés par de la matière secondaire, du combustible secondaire ou de l'énergie récupérée quittant le système. Il couvre, par exemple, les impacts évités par le recyclage de certains matériaux.

IFC4.3 et poids carbone des matériaux de construction

Actuellement, dans les IFC 4.0 (norme ISO 16739)⁴⁰, il n'y a pas de PropertySet spécifique au poids carbone des matériaux de construction (béton, acier, déblais...), et encore moins pour les énergies consommées pour leur mise en œuvre.

Il est bien sûr possible de définir un PropertySet pour un projet donné (et pour chacun des matériaux consommés sur le projet), mais il faudra le définir dans la convention BIM afin que tous les acteurs utilisent la même dénomination pour établir un bilan global.

Concernant les IFC 4.3 en cours de normalisation ISO, il y a peu de référence au carbone, si ce n'est pour les taux admissibles de carbone dans les locaux et les capteurs associés⁴¹ (voir Fig 7).

- CarbonContent CarbonContent The *carbon* content in the fuel This is measured in weight of *carbon*
- GasDetected formula For example *carbon* monoxide is CO *carbon* dioxide is CO2 oxygen is O2
- CarbonDioxideEmissions CarbonDioxideEmissions Rate of emission of *carbon* dioxide
- Pset_SensorTypeCO2Sensor Pset_SensorTypeCO2Sensor A device that senses or detects *carbon* dioxide
- SetPointCO2Concentration SetPointCO2Concentration The *carbon* dioxide concentration to be sensed
- COContent COContent *Carbon* monoxide CO content of the products of combustion This is measured
- CO2Content CO2Content *Carbon* dioxide CO2 content of the products of combustion This is measured
- PEnum_CompressedAirFilterType PEnum_CompressedAirFilterType Items ACTIVATEDCARBON Activated *Carbon*
- IfcAmountOfSubstanceMeasure substance when compared with the number of atoms in 0012 kg of *carbon* 12 Usually measure in mole mol
- IfcMedicalDevice *carbon* dioxide nitrogen and nitrous oxide Outlets for medical gasses should use _IfcValve_ with
- IfcSensorTypeEnum enumerations added Items COSENSOR A device that senses or detects *carbon* monoxide CO2SENSOR A

Fig 7. Référence au carbone dans les PropertySet des IFC 4.3

IFC 4.3 et poids carbone des énergies

Concernant les énergies nécessaires pour la mise en œuvre des matériaux de construction, on peut trouver dans les IFC 4.3 un PropertySet pour le fuel⁴² (Voir Fig 8).

⁴⁰ NF EN ISO 16739, *Classes de fondation d'industrie (IFC) pour le partage des données dans le secteur de la construction et de la gestion des installations*, Collections AFNOR, 2016.

⁴¹ buildingSMART International Limited, *IFC 4.3.x*, <https://ifc43-docs.standards.buildingsmart.org/>, consulté le 31 mars 2023.

⁴² buildingSMART International Limited, *8.10.4.5 Pset_MaterialFuel*, https://ifc43-docs.standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4x3/HTML/lexical/Pset_MaterialFuel.htm, consulté le 31 mars 2023.

8.10.4.5 Pset_MaterialFuel

8.10.4.5.1 Semantic definition [↗](#)

A set of extended material properties of fuel energy typically used within the context of building services and flow distribution systems.

8.10.4.5.2 Applicable entities [↗](#)

PSET_MATERIALDRIVEN The property sets defined by this `IfcPropertySetTemplate` are to be encoded in an `IfcMaterialProperties` entity and assigned to an `IfcMaterialDefinition`.

- `IfcMaterial`

8.10.4.5.3 Properties [↗](#)

Name	Property Type	Data Type	Description
CombustionTemperature	<code>IfcPropertySingleValue</code>	<code>IfcThermodynamicTemperatureMeasure</code>	Combustion temperature. Combustion temperature of the material when air is at 298 K and 100 kPa. ↗
CarbonContent	<code>IfcPropertySingleValue</code>	<code>IfcPositiveRatioMeasure</code>	The carbon content in the fuel. This is measured in weight of carbon per unit weight of fuel and is therefore unitless. ↗
LowerHeatingValue	<code>IfcPropertySingleValue</code>	<code>IfcHeatingValueMeasure</code>	Lower Heating Value is defined as the amount of energy released (MJ/kg) when a fuel is burned completely, and H2O is in vapor form in the combustion products. ↗
HigherHeatingValue	<code>IfcPropertySingleValue</code>	<code>IfcHeatingValueMeasure</code>	Higher Heating Value is defined as the amount of energy released (MJ/kg) when a fuel is burned completely, and H2O is in liquid form in the combustion products. ↗

Table 8.10.4.5.A [↗](#)

Fig 8. PropertySet pour le fuel dans les IFC 4.3

Impact carbone des carburants

Encore faut-il comprendre comment lier ce `MaterialFuel` à un matériau de construction, sachant que les carburants ont des impacts carbone selon leur nature, et selon le scope considéré (scope 1, scope 2, scope 3a)⁴³ (cf. Fig 9 et Fig 10).

⁴³ Le scope 1 regroupe les « émissions directes provenant des installations fixes ou mobiles situées à l'intérieur du périmètre organisationnel, c'est-à-dire émissions provenant des sources détenues ou contrôlées par l'organisme comme par exemple : combustion des sources fixes et mobiles, procédés industriels hors combustion, émissions des ruminants, biogaz des centres d'enfouissements techniques, fuites de fluides frigorigènes, fertilisation azotée, biomasses... ».

Le scope 2 correspond aux « émissions indirectes associées à la production d'électricité, de chaleur ou de vapeur importée pour les activités de l'organisation ».

Le scope 3 rassemble les « autres émissions indirectement produites par les activités de l'organisation qui ne sont pas comptabilisées au scope 2 mais qui sont liées à la chaîne de valeur complète comme par exemple : l'achat de matières premières, de services ou autres produits, déplacements des salariés, transport amont et aval des marchandises, gestion des déchets générés par les activités de l'organisme... ».

Source : ADEME, Territoires & Climat, BEGES, <https://www.territoires-climat.ademe.fr/ressource/120-40>, consulté le 31 mars 2023.

	Facteur d'émission	Unité du facteur d'émission
Carburants		
Essence Sans Plomb ou E10	2,21	kgCO2eq/L
Gazole routier B7	2,49	kgCO2eq/L
Gazole non routier	2,57	kgCO2eq/L
Fioul domestique	2,68	kgCO2eq/L
Fioul Lourd	2,83	kgCO2eq/L
Gaz	0,17	kgCO2eq/kWh
Bio Gaz	0,00	kgCO2eq/kWh
Bio GNV	0,02	kgCO2eq/kg
GNV	2,41	kgCO2eq/kg
Essence E85	0,37	kgCO2eq/L
Fluides frigorigènes	1,40	kgCO2eq/m³
GPL	1,60	kgCO2eq/L
GNL	1,69	kgCO2eq/L
Hydrogène - électrolyse Mix EnR (hors transport)	1,69	kgCO2eq/kgH2
Hydrogène - électrolyse Mix France (hors transport)	2,93	kgCO2eq/kgH2
Hydrogène - électrolyse UE (hors transport)	21,00	kgCO2eq/kgH2
Hydrogène - vaporeformage de biométhane (hors transport)	2,25	kgCO2eq/kgH2
Hydrogène - vaporeformage de gaz naturel (hors transport)	11,80	kgCO2eq/kgH2
Transport d'hydrogène à 200 bars	-	kgCO2eq/kgH2/100km
Gaz naturel	0,19	kgCO2eq/kWh (PCS)

Fig 9. Émissions liées à la combustion de carburant sur site (scopes 1 et 2)

	Facteur d'émission - Amont	Unité du facteur d'émission
Carburants		
Essence Sans Plomb ou E10	0,49	kgCO2eq/L
Gazole routier B7	0,61	kgCO2eq/L
Gazole non routier	0,59	kgCO2eq/L
Fioul domestique	0,57	kgCO2eq/L
Fioul Lourd	0,45	kgCO2eq/L
Gaz	-	kgCO2eq/kWh
Bio Gaz	-	kgCO2eq/kWh
Bio GNV	0,59	kgCO2eq/kg
GNV	0,55	kgCO2eq/kg
Essence E85	0,74	kgCO2eq/L
Fluides frigorigènes	0,00	kgCO2eq/m³
GPL	0,26	kgCO2eq/L
GNL	0,46	kgCO2eq/L
Hydrogène - électrolyse Mix EnR (hors transport)	0,24	kgCO2eq/kgH2
Hydrogène - électrolyse Mix France (hors transport)	0,39	kgCO2eq/kgH2
Hydrogène - électrolyse UE (hors transport)	2,39	kgCO2eq/kgH2
Hydrogène - vaporeformage de biométhane (hors transport)	0,38	kgCO2eq/kgH2
Hydrogène - vaporeformage de gaz naturel (hors transport)	0,38	kgCO2eq/kgH2
Transport d'hydrogène à 200 bars	1,12	kgCO2eq/kgH2/100km
Gaz naturel	0,03	kgCO2eq/kWh (PCS)

Fig 10. Émissions liées à l'amont (extraction et acheminement de carburant) (scope 3a)

Impact carbone des énergies

De même, les énergies nécessaires sur le chantier pourraient être décrites dans un PropertySet spécifique, avec un lien vers les matériaux de construction, qui tiendraient compte des différents types d'énergie utilisés sur le chantier et des scopes considérés (cf. Fig 11 et Fig 12).

	Facteur d'émission	Unité du facteur d'émission
Consommations énergétiques		
Electricité (réseau)	0,05	kgCO2eq/kWh
Réseau de chaleur vapeur	0,17	kgCO2eq/kWh

Fig 11. Émissions liées à la combustion d'énergie sur site (scopes 1 et 2)

	Facteur d'émission - Amont	Unité du facteur d'émission
Consommations énergétiques		
Electricité (réseau)	0,004	kgCO2eq/kWh
Réseau de chaleur vapeur	-	kgCO2eq/kWh

Fig 12. Émissions liées à l'amont (extraction et acheminement d'énergie) (scope 3a)

Recommandations

La définition d'un « PropertySet Carbon » par le donneur d'ordre permettrait d'homogénéiser et de faciliter le calcul de l'impact carbone de certains matériaux de construction utilisés sur chaque lot d'un projet. Les valeurs d'émission de ce PropertySet seraient donc indexées sur une base de données commune à tous les intervenants.

Pour obtenir un résultat cohérent, il serait donc également nécessaire d'imposer à tous les modélisateurs d'utiliser une classification commune d'objets, avec en particulier un nommage commun des matériaux à mettre en œuvre (puisque les émissions de CO₂ sont affectées à des matériaux, en fonction de leur localisation et provenance).

Les difficultés à résoudre viennent de :

- La mise en œuvre des matériaux qui varie d'un projet à l'autre, d'un entrepreneur à l'autre, des conditions et facilités de mise en œuvre. C'est pourquoi il faut également tenir le décompte des quantités d'énergies utilisées, qui ne peuvent en aucun cas être directement liées aux objets à construire ou aux engins et matériels utilisés pour la construction (puisque'ils sont rarement modélisés dans un modèle numérique, sauf peut-être dans un modèle 4D qui représente l'enchaînement des phases de réalisation et les séquences de construction, ce qui nécessiterait de « descendre » dans un niveau de détail peu pratiqué actuellement) ;
- Certains matériaux difficilement représentables dans un modèle numérique, comme les déblais et remblais, dont les quantités théoriques sont connues, mais dont les mouvements dépendent de nombreux facteurs liés à la nature-même de ces matériaux, de leur stockage provisoire, de leur traitement éventuel...

3.4 Prise en compte de l'impact carbone des outils numériques

Recommandations

Il a été établi précédemment que l'empreinte carbone numérique du BIM au regard des projets dont il est au service est infime au regard de l'impact du projet lui-même. Ce faible poids relatif ne justifie cependant pas de négliger l'empreinte numérique en termes d'émission de GES et plus généralement en termes d'impacts environnementaux. Il est nécessaire de mettre en place une gestion épargnant au maximum ces impacts lors de la réalisation des projets BIM. Cette gestion est basée sur un certain nombre de recommandations de bon sens qui seront mises en œuvre en veillant bien entendu à ne pas impacter la performance des projets.

- Dimensionner le volume d'équipements matériels au plus juste ;
- Appliquer une politique d'achats des équipements en tenant compte des données sur les impacts environnementaux et les engagements des fournisseurs en termes de réduction de ces impacts ;
- Maximiser leur durée de vie (favoriser les équipements de bonne qualité, performants pour éviter l'obsolescence trop rapide et avec des indices de réparabilité élevée) ;
- Favoriser le réemploi de terminaux (pc et écran) pour les activités annexes ou peu gourmandes pour mieux amortir le coût initial de production ;
- Sélectionner les plateformes cloud en fonction de leur localisation et/ou leurs sources d'approvisionnement en électricité ;
- Investir dans une organisation rationnelle minimisant les supports de stockages intermédiaires (éviter le laisser-faire et la multiplicité des supports intermédiaires) ;
- Mettre en place une procédure de nettoyage et suppression des données devenues inutiles ;
- Favoriser les IoT fonctionnant sur les réseaux bas débits (Lora, SigFox...) lorsque les contraintes d'acquisitions de données (volume, fréquence, pilotage) le permettent ;
- Réserver les grands écrans aux besoins justifiés.

Et surtout ne pas faire de contresens : **le numérique est un formidable moyen de réduire l'impact carbone de tous les secteurs. Il est donc nécessaire d'en développer les usages comme le BIM, mais en intégrant la dimension impact carbone dans les modalités de mise en œuvre de ces usages et en maximisant la mutualisation avec d'autres applications.**

Données mortes

Une fois la partie étude terminée, les données du BIM devront être conservées sur une longue période (plusieurs décennies) pour avoir la possibilité d'y revenir. Ceci implique des modèles d'archivages adaptés à des longues périodes. Les infrastructures nécessaires à ce type d'archivage peuvent être « tièdes » (données accessibles en lecture seule), « froides » (données accessibles de manière limitée en lecture seule et en faible intensité -> équipements ne nécessitant pas de grandes performances), ou « inertes » (données stockées sur des équipements à l'arrêt.

L'archivage des maquettes BIM nécessite une gestion rigoureuse de la gestion des versions des applicatifs BIM.

Le BIM réduit d'autres impacts

L'usage des maquettes BIM entraîne une réduction très importante de l'usage des courriers électroniques ou des plans de constructions classiques permettant ainsi une réduction d'impact global.

openBIM

L'Open BIM est un programme de coopération universel reposant sur des standards et des processus de travail ouverts et destinés au domaine de la conception, de la construction et de l'utilisation des ouvrages bâtis.

L'Open BIM permet d'échanger des données de projets BIM modélisés à partir de logiciels différents, grâce à des formats normés ou standardisés (par exemple les IFC développés par l'association internationale buildingSMART).

L'utilisation de l'openBIM est également à promouvoir, puisque les processus s'appuient sur des technologies qui ne nécessitent pas des transformations d'un format dans un autre, qui permettent la fédération de modèles très divers et assurent l'accessibilité et la pérennité de la donnée pendant la durée de vie des infrastructures et ouvrages bâtis.

4. PREMIER CAS D'ÉTUDE : TUNNEL

4.1 Projets L15 Sud T2A / T3A

Présentation du cas d'étude

Hypothèses concernant la phase de construction

Le cas d'étude « Tunnel » concerne deux lots du Grand Paris Express, dans leur phase de construction.

La phase de construction considérée s'étend de l'Ordre de Service des Travaux (OS) jusqu'à la livraison des ouvrages.

Les objectifs de l'étude

Les données d'entrée sont les suivantes :

- Bilan carbone des usages du numérique pendant la phase de construction ;
- Bilan carbone du projet :
 - Ouvrage fini (matériaux, équipements...)
 - Construction de l'ouvrage (matériels utilisés, ressources mobilisées...).

Les objectifs de cette étude sont les suivants :

- Établir le ratio bilan carbone des usages du numérique par rapport au bilan carbone complet du projet et de sa construction ;
- Estimer l'impact d'une démarche BIM sur les économies de carbone apportées au projet et à sa construction.

Le Grand Paris Express

Bilan carbone des chantiers de la SGP

Le Grand Paris Express est le nouveau métro qui reliera les principaux lieux de vie et d'activité en banlieue sans passer par Paris. Son pilotage est assuré par la Société du Grand Paris. Notre cas d'étude repose sur deux lots de la Ligne 15 Sud.

Le rapport annuel de la SGP publie les chiffres suivants du bilan carbone (Fig 13), qui donnent une référence à notre cas d'étude. On constate que sont pris en compte actuellement :

- La consommation d'électricité ;
- La consommation de carburant ;
- Les principaux matériaux mis en œuvre (acier et les bétons) ;
- Les transports des déblais.

Il semble en effet assez simple d'obtenir ces chiffres de la part de toutes les entreprises travaillant sur ces chantiers, puisque ces valeurs sont obtenues directement par les logiciels de comptabilité des entreprises.

À ces données doivent se rajouter les émissions liées à :

- L'approvisionnement, qui sont évaluées à au moins deux à trois fois inférieures à celles liées au transport des déblais évacués (déblais excavés des gares enterrées et des tunnels) ;
- Toutes les autres sources d'émissions de gaz à effet de serre :
 - Fabrication des matériels de mise en œuvre (coffrages, tunneliers...)
 - Fabrication des engins de chantiers (manutention, terrassement...)
 - Les autres matériaux (équipements, rails, réseaux...)
 - Les outils numériques ;
 - ...

La ligne 15 sud du GPE

Ligne 15 Sud / Lot T2A

Organisation physique

BILAN CARBONE 2021 DES CHANTIERS DU GRAND PARIS EXPRESS⁽¹⁾ En t éqCO₂

Principaux postes d'émission de CO₂

Total des émissions 2021 de gaz à effet de serre des chantiers du Grand Paris Express : **416 648 t éqCO₂**

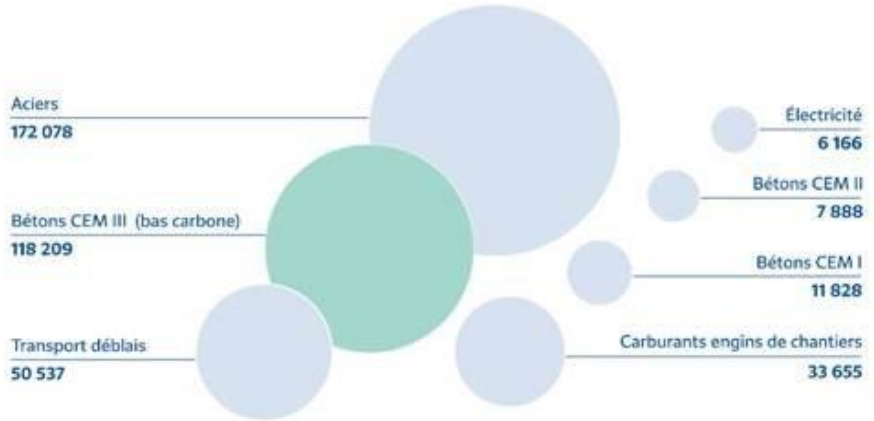


Fig 13. Bilan carbone 2021 des chantiers du GPE

La ligne 15 Sud du Grand Paris Express s'étend du Pont de Sèvres jusqu'à Noisy-Champs. Elle est découpée en deux tronçons (Tronçon 2 et Tronçon 3) et comporte huit lots distincts. Notre cas d'étude s'intéressera particulièrement aux lots T2A et T3A (pour des montants de marché – Part Bouygues Travaux Publics – respectivement de 800M€ et 500M€, soit un total de 1,3Md€).

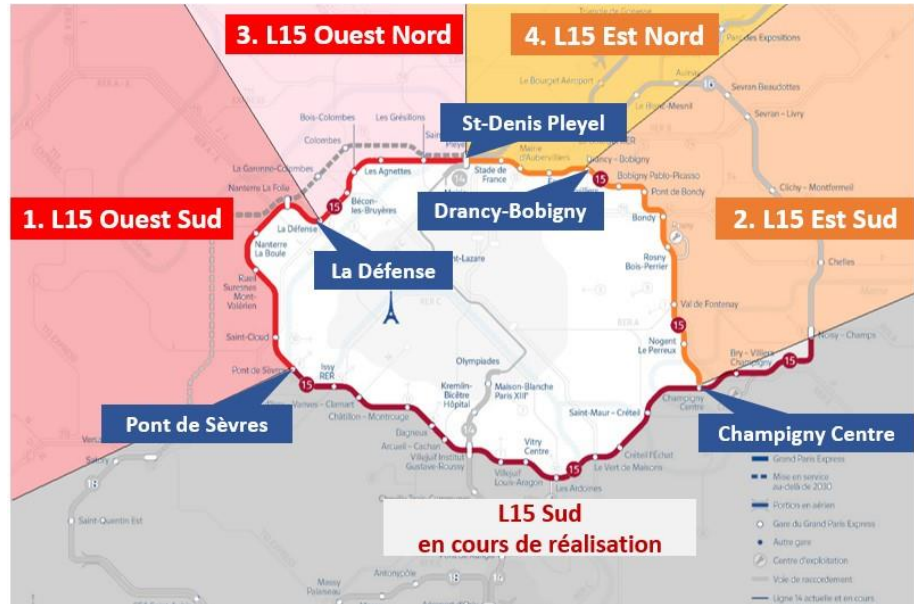


Fig 14. Ligne 15 du Grand Paris Express

Le Lot T2A est le tronçon compris entre les gares de Villejuif Louis-Aragon (hors gare) et Créteil l'Éclat.

Ce lot comprend la réalisation de 6,6 kilomètres de tunnel principal, de cinq ouvrages annexes et d'un ouvrage de débranchement entre la Ligne 15 Sud et le raccordement au site de maintenance des infrastructures (SMI) de Vitry-sur-Seine,

via un tunnel monovoie de 1100 m. Le projet comporte également la réalisation du génie civil de quatre gares enterrées : Créteil l'Échât, Le Vert de Maisons, Les Ardoines et Vitry-Centre.

- Nombre de sites/agences : 8
 - Vitry ;
 - Vitry Tremblay ;
 - Vitry Pasteur ;
 - Vitry Rouget de Lisle ;
 - Vitry Gabriel Péri ;
 - Maison Alfort ;
 - Friche.
- Nombre de gares : 4
- Nombre ouvrages annexes : 5 + 1 ouvrage de débranchement
- Longueur des tunnels : 6600m + 1100m

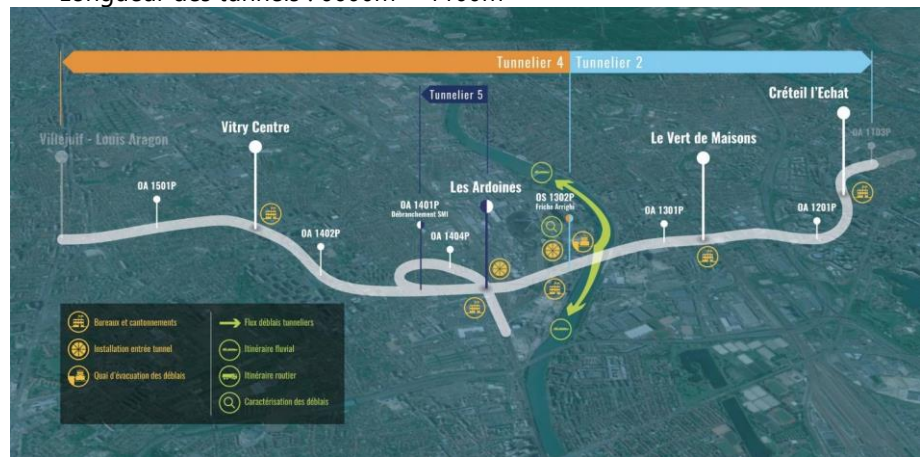


Fig 15. Ligne 15 Sud – Lot T2A

Échéances principales

- Dates principales
 - OS de démarrage des travaux : 31 janvier 2017
 - Date livraison prévue : décembre 2023
- Avancement projet à fin janvier 2023 : 97,4 %.

Ligne 15 Sud / Lot T3A

Organisation physique

Le lot T3A est le tronçon compris entre les gares de Pont de Sèvres et de Fort d'Issy-Vanves-Clamart.

Ce lot comprend le creusement d'un tunnel monotube de 4,2 kilomètres, ainsi que la réalisation du génie civil des gares de Pont de Sèvres et d'Issy RER et la réalisation de trois ouvrages annexes.

- Nombre de sites / agences : 3
 - Sèvres ;
 - Boulogne Billancourt ;
 - Issy Les Moulineaux.
- Nombre de gares : 2
- Nombre ouvrages annexes : 3
- Longueur des tunnels : 4200 m

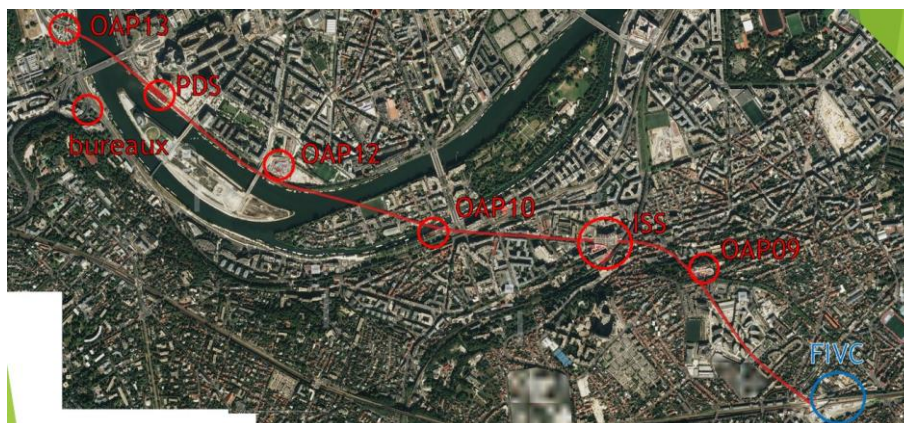


Fig 16. Ligne 15 Sud – Lot 3A

Échéances principales

Dates principales :

- Ordre de service : juin 2017
- Date de réception prévisionnelle : avril 2025
- Durée totale prévisionnelle : 94 mois
- Avancement projet à fin 2022 : 90 % avancement.

OUVRAGE	LIBELLE SYNTHETIQUE	Date Cibles PLG Directeur
OA P13	Repli complet OA P13	14/10/22
PDS	Repli pour partie des quais et dalle de sous-face de la galerie au-dessus des voies Boite Gare PDS	02/01/23
PDS	Repli complet Boite Gare PDS	30/04/23
OA P12	Repli complet OA P12	31/10/23
OA P10	Repli complet OA P10	31/10/23
Tunnel	Mise à disposition complète du tunnel et des rameaux	02/01/23
ISS	Mise à disposition quai et sous-face dalle N-2 Boite Gare ISS	02/01/23
ISS	Repli complet Boite Gare ISS + couloir Emergence	01/03/23
ISS	Repli Est Boite Gare ISS + couloir Correspondance + tout le reste du GC	18/12/23
ISS	Repli complet Correspondance ISS	25/10/24
ISS	Repli complet Emergence ISS	31/10/22
OAP09	Repli complet OA P09	08/02/23
FIVC	Repli complet FIVC par T3A	02/05/22

Fig 17. Principaux jalons du projet T3A

Main d'œuvre T3A

Partenariat

Partenaires du sous groupement réalisation du groupe Horizon (génie civil des Tunnels, des gares et des ouvrages annexes) :

- Bouygues Construction :
 - Bouygues Travaux Publics (Mandataire) ;
 - Bouygues Bâtiment Ile de France ;
 - Bouygues Energie & Services.

Mobilisation

- Solétanche Bachy
- Bessac
- Solétanche Bachy Tunnels
- Tédélis
- Bouygues Travaux Publics (Fig 18) :
 - 71% du personnel total mobilisé sur la durée du projet (94 mois) ;
 - Moyenne de mobilisation : 77 collaborateurs / mois ;
 - Personnel au pic : 130 collaborateurs.
- Groupement constructeurs Horizon (Fig 19) :
 - Moyenne de mobilisation : 107 collaborateurs / mois
 - Personnel au pic : 186 collaborateurs.

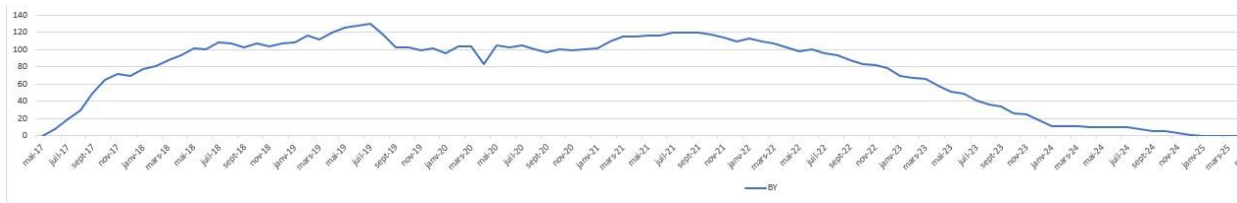


Fig 18. Courbe mobilisation Personnel Bouygues Travaux Publics (Cadres et Maitrise) du lot T3A

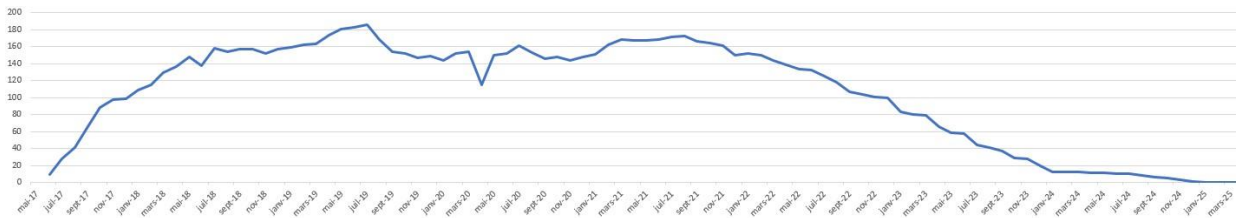


Fig 19. Courbe mobilisation Personnel Groupement Constructeurs (Cadres et Maitrise) du lot T3A

Identification des collaborateurs

- Adresse électronique spécifique au projet :
 - Oui sur T2A (@horizon-t2a.com) ;
 - Non sur T3A (@bouygues-construction.com + partenaires).
- Authentification Windows sur un Domaine spécifique :
 - Non sur T2A ;
 - Non sur T3A.

Main d'œuvre externe

Évaluation de l'écosystème complet :

- Sous-traitants ;
- Fournisseurs ;
- Prestataires ;
- Client.

Cette évaluation n'a pas été possible.

Bilan ACV des chantiers du GPE

Chaque lot du projet doit fournir annuellement son bilan équivalent Carbone à la Société du Grand Paris, conformément au cahier des charges du Dossier de Consultation des Entreprises (Voir Annexe 9.4).

Le scope est restreint :

- La consommation d'électricité ;
- La consommation de carburant ;
- Les principaux matériaux mis en œuvre (acier, bétons, chaux) ;
- Les transports des déchets et déblais.

L'outil utilisé est un fichier Excel, dont les facteurs d'émissions proviennent de différentes sources (voir Fig 20), et les quantités sont extraites directement du logiciel de comptabilité du chantier.

Facteurs d'émission

Les facteurs d'émission utilisés proviennent de plusieurs sources, puisqu'aucune source ne possède l'ensemble des postes d'émissions à évaluer (Fig 20).

Poste d'émissions	Facteurs d'émissions	Source des facteurs d'émission	Unité des Facteurs d'émissions
Gazole routier B7	3,099	ADEME	kgCO2eq/L
GNR	3,159	ADEME	kgCO2eq/L
Essence Sans Plomb	2,704	ADEME	kgCO2eq/L
Electricité	0,0577 (France)	IEA (International Energy Agency)	kgCO2eq/KWh
Gaz	0,169	ADEME	kgCO2eq/KWh
Fioul	3,251	ADEME	kgCO2eq/L
Béton	selon type ciment	ATIHL (France), OneClick LCA (autres pays)	kgCO2eq/m3
Ciment	selon type ciment	DIOGEN	kgCO2eq/tonne
Acier des armatures	900 (France)	OneClick LCA	kgCO2eq/tonne
Chaux	1 041	ADEME	kgCO2eq/tonne
Déchets inertes (yc quantité recyclée)	13	ADEME	kgCO2eq/tonne
Déchets non dangereux (yc quantité recyclée)	87	ADEME	kgCO2eq/tonne
Déchets dangereux	844	ADEME	kgCO2eq/tonne
Déblais inertes (yc quantité recyclée)	4,632	Guide CEREMA calculé sur 50km. Le guide du CEREMA propose le FE suivant : 0.176kgCO2/m3.km pour les projets routiers. La distance d'évacuation a été estimée à 50km (hypothèse).	kgCO2eq/tonne
Déblais non dangereux (yc quantité recyclée)	4,632	Guide CEREMA calculé sur 50km. Le guide du CEREMA propose le FE suivant : 0.176kgCO2/m3.km pour les projets routiers. La distance d'évacuation a été estimée à 50km (hypothèse).	kgCO2eq/tonne
Déblais dangereux	4,632	Guide CEREMA calculé sur 50km. Le guide du CEREMA propose le FE suivant : 0.176kgCO2/m3.km pour les projets routiers. La distance d'évacuation a été estimée à 50km (hypothèse).	kgCO2eq/tonne

Fig 20. Liste des facteurs d'émission et sources

Bilan ACV T3A

Matériaux entrants

- Matériaux pris en compte pour les ouvrages réalisés en place : bétons frais, aciers, chaux.

Pour un **total d'émissions de 6 509 t CO₂eq** (Fig 21) pour les ouvrages en place.

- À ce total, il faut ajouter les éléments préfabriqués (voussoirs des tunnels) dont le détail est le suivant :
 - Émissions bétons éléments préfabriqués : 3 910 t CO₂eq ;
 - Émissions aciers éléments préfabriqués : 2 009 t CO₂eq.

Pour un **total d'émissions de 12 428 t CO₂eq**.

	Facteur d'émission	Unité du facteur d'émission	Quantité	Unité	Emissions (T CO ₂ eq)
Béton					
Béton à base de CEM I					0
Volume béton CEM I (310-359kg)	285	kg CO ₂ e/m ³	514	m ³	147
Volume béton CEM I (>=400kg)	352	kg CO ₂ e/m ³	609	m ³	214
Béton à base de CEM II A					0
Volume béton CEM II A (280-309kg)	228	kg CO ₂ e/m ³	3 750	m ³	854
Volume béton CEM II A (310-359kg)	254	kg CO ₂ e/m ³	4 260	m ³	1 081
Béton à base de CEM III A					0
Volume béton CEM III A (310-359kg)	163	kg CO ₂ e/m ³	142	m ³	23
Volume béton CEM III A (360-399kg)	180	kg CO ₂ e/m ³	11 528	m ³	2 074
Volume béton CEM III A (>=400kg)	197	kg CO ₂ e/m ³	3 667	m ³	722
			Sous-total		5 116
Acier					
Acier de ferrailage (France)	900	kgCO ₂ eq/T	1 103	T	992
			Sous-total		992
Autres matériaux entrants					
Chaux	1 041	kgCO ₂ eq/T	385	T	401
			Sous-total		401
			Total		6 509

Énergies

Fig 21. Bilan carbone Matériaux entrants [T3A-2021]

- Énergies prises en compte : électricité et carburants
- Scopes :
 - Émissions liées à la combustion sur site (scopes 1 et 2) ;
 - Émissions liées à l'amont (extraction, acheminement) (scope 3a).

Pour un **total d'émissions de 2 610 tCO₂eq + 544 tCO₂eq = 3 155 tCO₂eq** (Fig 22).

	Emissions liées à la combustion sur site (scope 1&2)				Emissions liées à l'amont (extraction, acheminement) (scope 3a)					
	Facteur d'émission	Unité du facteur d'émission	Quantité	Unité	Emissions (T CO ₂ eq)	Facteur d'émission - Amont	Unité du facteur d'émission	Quantité	Unité	Emissions (T CO ₂ eq)
Consommations énergétiques										
Electricité (réseau)	0	kgCO ₂ eq/kWh	6 208 067	kWh	335	0	kgCO ₂ eq/kWh	6 208 067	kWh	23
			Sous-total		335			Sous-total		23
Carburants										
Essence Sans Plomb ou E10	2	kgCO ₂ eq/L	46	L	0	0	kgCO ₂ eq/L	46	L	0
Gazole non routier	3	kgCO ₂ eq/L	885 143	L	2 275	1	kgCO ₂ eq/L	885 143	L	521
Gaz	0	kgCO ₂ eq/kWh	312	kWh	0	0	kgCO ₂ eq/kWh	312	kWh	0
			Sous-total		2 275			Sous-total		521
			Total Energie (combustion)		2 610			Total Energie (amont)		544

Fig 22. Bilan carbone Énergies (scopes 1 & 2) et scope 3 [T3A-2021]

Déchets et déblais

- Déchets pris en compte : déchets inertes, non dangereux et dangereux

Pour un **total d'émissions de 2 256 t CO₂eq** (Fig 23).

	Facteur d'émission	Unité du facteur d'émission	Quantité (en T)	Emissions (T CO ₂ eq)
Déchets inertes (yc quantité recyclée)	13	kgCO ₂ eq/t	2296	30
Déblais inertes (yc quantité recyclée)	5	kgCO ₂ eq/t	304585	1411
Sédiments de dragage	5	kgCO ₂ eq/t	0	0
Déchets non dangereux (yc quantité recyclée)	87	kgCO ₂ eq/t	1164	101
Déblais non dangereux (yc quantité recyclée)	5	kgCO ₂ eq/t	143608	665
Déchets dangereux	844	kgCO ₂ eq/t	36	30
Déblais dangereux	5	kgCO ₂ eq/t	4070	19
			Total	2256

Fig 23. Bilan carbone Déchets [T3A-2021]

Bilan carbone T3A
2020-2021-2022

Voici le récapitulatif des émissions en tonnes équivalent carbone du lot T3A.

La grande différence entre 2020 et 2021 s'explique par la pose des voussoirs des tunnels (éléments préfabriqués) pendant l'année 2021.

Année	t CO ₂ eq
2020	10 417 t CO₂eq
2021	17 839 t CO₂eq
2022	11 997 t CO₂eq

Bilan ACV T2A

Bilan carbone T2A
2020-2021-2022

La même démarche que pour le lot T3A a été appliquée. Voici le récapitulatif des émissions en tonnes équivalent carbone du lot T2A.

La grande différence entre 2020 et 2021 s'explique par la pose des voussoirs des tunnels (éléments préfabriqués) pendant l'année 2021.

Année	t CO ₂ eq
2020	12 862 t CO ₂ eq
2021	27 290 t CO ₂ eq
2022	20 346 t CO ₂ eq

Architecture informatique

Architecture Infrastructure T2A

L'architecture informatique destinée aux communications entre les agences et les différents bureaux répartis tout au long du projet linéaire est composée des éléments suivants :

- Liaison agences (couverture bureaux) ;
- Liaison chantier (couverture gares / couverture tunnel) ;
- Liaison tunnelier.

AGENCES T2A	LIGNES	MATÉRIEL OPÉRATEUR	MATÉRIEL SUPPL
VITRY	FibreOpt 100M +23 4GMPLS disséminées	CISCO 900 CISCO 900 + 23 HUAWEI B521	HP 5500 48 PORTS * 4
MAISON ALFORT	4G MPLS	CISCO 900 + HUAWEI B521	
FRICHE	FibreOpt 100M	CISCO 900	HP 5500 48 PORTS * 12
VITRY TREMBLAY	FibreOpt 40M	CISCO 900	
VITRY PASTEUR	FibreOpt 20M	CISCO 900	
CRÉTEIL	4G MPLS	CISCO 900 + HUAWEI B521	
VITRY ROUGET DE LISLE	4G MPLS	CISCO 900 + HUAWEI B521	
VITRY GABRIEL PÉRI	FibreOpt 40M	CISCO 900	

Architecture Infrastructure T3A

AGENCES T3A	LIGNES	MATÉRIEL OPÉRATEUR	MATÉRIEL SUPPL
SÈVRES	FibreOpt 100M +25 4GMPLS disséminées	CISCO 900 CISCO 900 + 25 HUAWEI B521	HP 5500 48 PORTS * 12
BOULOGNE BILLANCOURT	FibreOpt 20M	CISCO 900	HP 5500 48 PORTS * 5
ISSY LES MOULINEAUX	FibreOpt 100M	CISCO 900	HP 5500 48 PORTS * 9

Plateforme de collaboration interne

Les serveurs et plateformes de collaboration utilisés sur ces chantiers sont les suivants :

- Common Data Environment (CDE) : non
- Outils d'échange de données spécifiques au projet (Fig 24) :
 - T2A : SharePoint (2,611 To) + serveur local données confidentielles (806 Go) ;
 - T3A : SharePoint (50 Go) + serveur local données confidentielles (2,387 To).



Fig 24. Occupation serveurs en septembre 2022

GED

eDoc (GED des documents chantiers) :

- Plans (documents à cartouche avec indice) : format natif et format pdf (contractuels) ;
- Courriers et notes de calcul (documents figés sans indice) : format natif (word) ;
- Bordereaux d'envoi de plans : format natif (word).

Le serveur principal est hébergé au siège social de Bouygues Construction (Guyancourt, 78) avec une redondance en Normandie (Val de Reuil, 14).

Lot GPE	Début	Fin	Contrib.	Utilis.	Plans	Vol natif (Mo)	Vol PDF (Mo)	Courriers	Bordx	Vol natif (Mo)
T2A	Janv 2017	Dec 2022	54	385	33 056	72 099	71 201	113 697	35 792	141 099
T3A	Juin 2017	Dec 2022	14	356	22 339	92 449	42 999	72 623	19 417	47 671

GED Kroqi

- T2A : Administration Systra – Kroqi très utilisé
La GED Lascom sera utilisée pour conserver ces modèles.
- T3A : Administration Ingerop – Kroqi peu utilisé.

Lot GPE	Début	Fin	Contrib.	Utilisateurs	Documents	Volume (Mo)
TA2	Mars 2019	2024	?	Plus de 450	635	23 000
T3A						5 000

Plateforme de collaboration Client

Plateforme Lascom (hébergée sous Microsoft Azure) mise en œuvre par SGP et utilisée sur toute la Ligne 15 Sud.

Tous les fichiers déposés sur Lascom sont au format pdf, et issus de eDOC (donc à ne pas compter deux fois).

1 Doc Manager principal sur chaque lot, avec deux assistants.

Lot GPE	Début	Fin	Contrib.	Utilisateurs	Documents	Volume (Mo)
TA2	Février 2017	2024	3	?	26 539	112 000
T3A	2017	2024	1	?	5 471	38 150

Matériels informatiques

- **Sur chantier** : Poste de travail / Station de travail (100 % mobilisation) amortis sur 4 ans
 - Postes fixes (serveurs) ;
 - Portables (distinction entre Portables BIM et Portables bureautiques) ;
 - Écrans supplémentaires (2 par portable BIM et 1 par Port. bureautique) ;
 - Tablettes (iPad pour OPR) ;
 - Téléphones professionnels / Téléphone personnels (hypothèse : au moins un téléphone par collaborateur) ;
 - Imprimantes / scanner ;
 - KBIM (2 sur T2A et 2 sur T3A) : utilisation 25 % pour navigation au sein de modèles et 75 % pour consultation de plans.
- **Au siège social de Bouygues TP** : Postes de travail / Station de travail (30 % mobilisation en raison de l'implication sur plusieurs projets) amortis sur 4 ans
 - Portables et écrans supplémentaires (2 par modeleurs BIM et 1 par utilisateur) ;
 - Téléphones professionnels ;
 - Imprimantes / scanner.

Consommation CO₂ des équipements

Les données concernant les consommations des matériels utilisés ont été récupérées sur les sites :

- <https://dataviz.boavizta.org>
- <https://dell.com/fr-fr/product-carbon-footprints>

avec l'hypothèse que ces matériels sont utilisés en France pendant une durée d'amortissement de 4 ans.

Ci-après le bilan annuel des matériels utilisés.

Chantier (100 %)	T2A	t CO ₂ eq	T3A	t CO ₂ eq
Poste fixe (serveur)	3	1,2	3	1
Portable bureautique	87	23,8	82	21,9
Écran	90	35,1	85	32,2
Portable BIM	13	4,5	19	6,6
Écran BIM	26	10,4	38	14,7
Tablette	4		4	
Imprimante A3 Couleur	1		2	
Téléphone pro	145		145	

Siège social (30 %)	T2A	t CO ₂ eq	T3A	t CO ₂ eq
Poste fixe (serveur)	0	0	0	0
Portable bureautique	6	1,7	5	1,4
Écran	6	2,4	5	2
Portable BIM	5	1,9	4	1,5
Écran BIM	10	3,9	8	3,1
Tablette	0	0	0	0
Imprimante	1		1	
Téléphone pro	11		9	

Messagerie

Plusieurs systèmes de messagerie cohabitent sur un grand chantier.

- La messagerie du projet ;
- Les messageries de chacun des partenaires ;
- Les messageries instantanées professionnelles de chacun des partenaires ;
- Les messageries instantanées « grand public » pour les échanges entre les membres d'une équipe (peu sécurisées mais très intuitives).

Serveur Outlook

Le serveur de messagerie Outlook n'est pas exclusivement dédié à ces projets. C'est pourquoi il n'est pas possible de connaître le nombre de messages échangés ni le volume de données que cela représente.

Messagerie instantanée

L'application Teams est très utilisée pour les messages professionnels instantanés ainsi que les réunions distancielles (principalement dans les bureaux).

L'application WhatsApp est très utilisée sur le chantier, avec de nombreux groupes ouverts par équipe ou discipline (principalement sur le chantier).

Les volumes de données concernées ne sont pas connus.

Matériels chantier

De nombreux capteurs sont installés sur le chantier et les engins, afin de capter des données pour :

- Suivre l'avancement du projet (creusement tunnelier, évacuation déblais...);
- Vérifier l'impact sur le voisinage (bruit, vibration, pollution...);
- Vérifier certaines hypothèses (chrono-analyses, déformation...);
- Prendre des décisions en fonction des données exposées sur des tableaux de bord.

Sur les chantiers T2A et T3A, la technologie utilisée est généralement basée sur un réseau LoRa (bas débit, longue portée) qui permet de connecter les IoT (objets connectés) en extérieur, en intérieur et en sous-sol. Ce réseau permet de transporter de petits paquets de données, sur de très longues distances (1 kilomètre en zone urbaine, et jusqu'à 20 kilomètres en zone rurale plane).

Engins chantier

- Engins terrassement (GPS, assistance au terrassement) : pas de données
- Camions d'évacuation des terres : 100 camions environ par jour, pour un volume de 2 Go par jour

Tunnelier

- 1 tunnelier sur chaque lot de notre étude, instrumenté d'environ 1000 capteurs (2000 variables captées : déformation jupe du tunnelier, usure des molettes...) - voir Fig 25 et Fig 26.
 - T2A : 8,81 To ;
 - T3A : 3,91 To.

Capteurs divers

De nombreux autres capteurs récupèrent des données stockées sur un DataLake. Ces données ne sont pas structurées mais peuvent être contextualisées pour des analyses diverses nécessaires pour piloter le chantier et prendre des décisions. Même si ces données ne sont pas utilisées à ce jour, elles serviront plus tard pour des statistiques ou pour alimenter des modèles prédictifs. Ces données devront alors être structurées et stockées sur un DataWarehouse, afin de généraliser des modèles pouvant être exploités sur d'autres chantiers et dans d'autres configurations.

- Stations totales de topographie (réseau 4G) : analyses automatiques de tassements et de déformations...
- Relevés numériques (Lidar) : analyse de profils et de respects de tolérances...
- Engins de levage et de manutention (grues à tour, grues mobiles...) : systèmes anticollision, outils analyse de cycle pour vérification saturation...
- Équipements particuliers (consommation électricité, consommation d'eau...)
- Contrôle accès du personnel sur site et en agence (badge entrée/sortie)
- Comptage du personnel en tunnel (puce sur casque - entrée/sortie)
- Caméras de sécurité anti-intrusion (Flux importants mais stockage sur courte période).

Toutes ces données captées sont donc stockées dans un DataLake puis un DataWarehouse (serveurs externalisés sur le cloud, dont le volume de données spécifique aux lots de notre étude est difficile à évaluer, sauf pour les tunneliers - voir Fig 25 et Fig 26 ci-après).

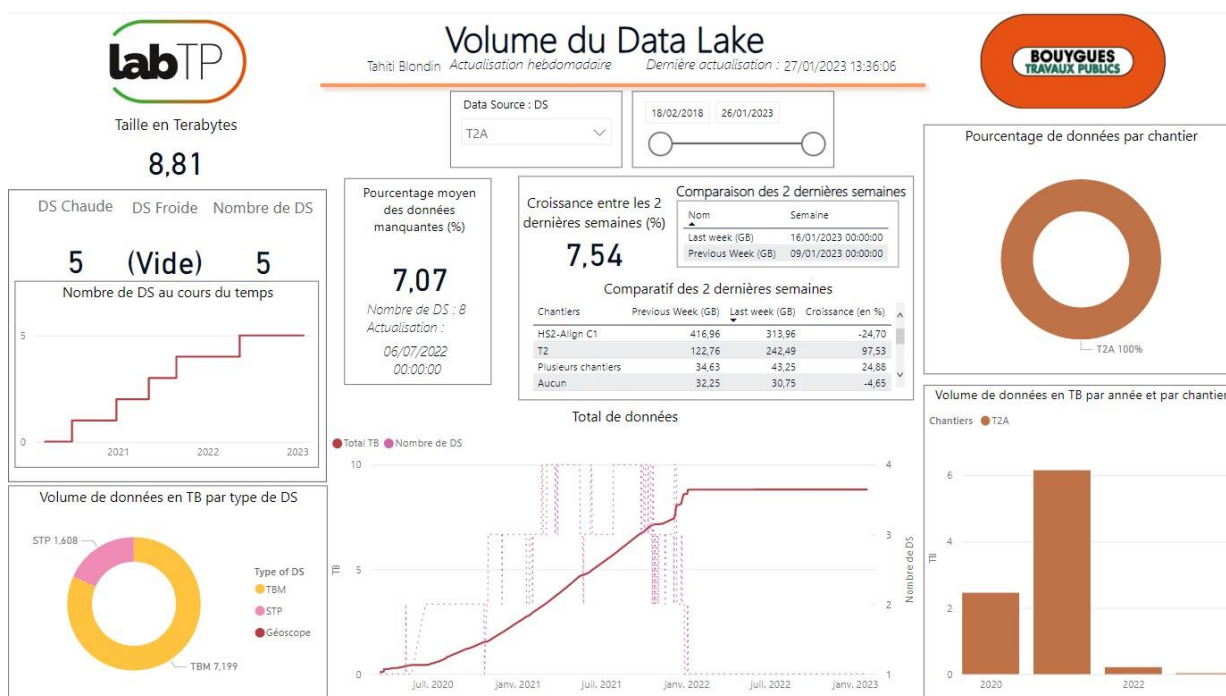


Fig 25. Volume de données IoT sur le lot T2A (à fin janvier 2023)

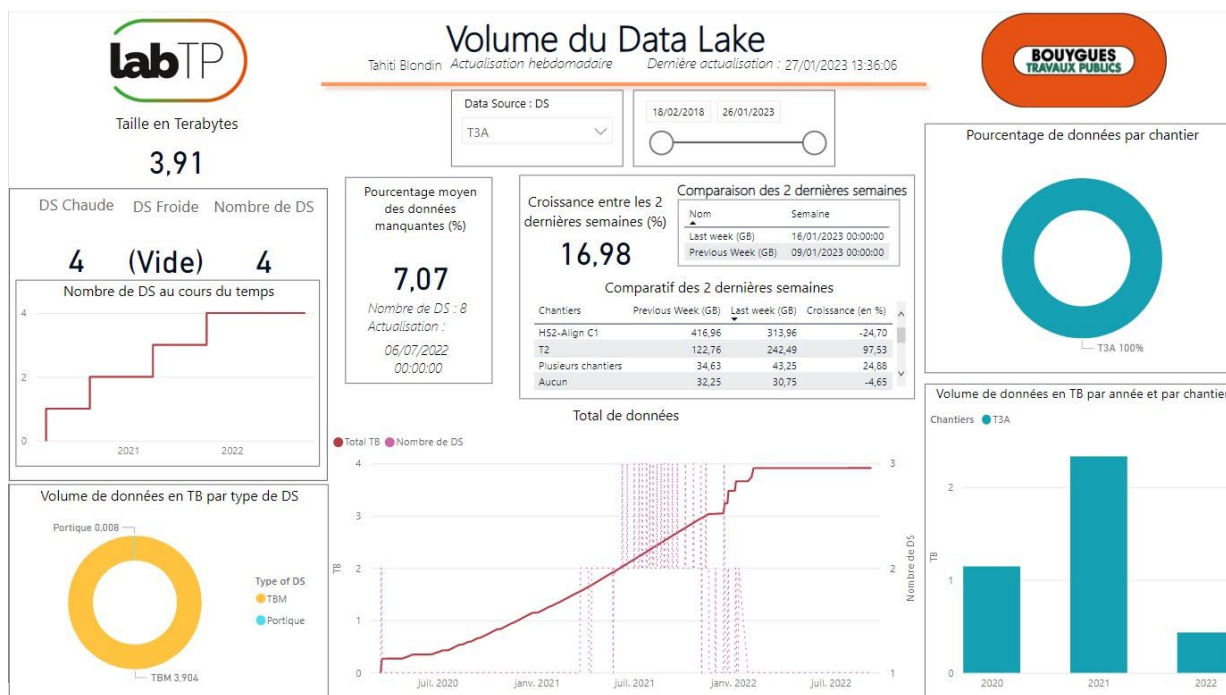


Fig 26. Volume de données IoT sur le lot T3A (à fin janvier 2023)

4.2 Résultats et interprétations

Bilan carbone - Année 2021

- Bilan carbone T2A : 27 290 t CO₂eq
- Bilan carbone T3A : 17 839 t CO₂eq
- Bilan carbone SGP : 416 648 t CO₂eq

Soit une part de 10,8 % du bilan global (calcul représentatif).

Empreinte carbone sur 3 ans (2020-21-22)

- Bilan carbone du digital T2A et T3A sur 3 ans : **192 t CO₂eq**
- Bilan carbone complet du projet (hors digital) :
 - T2A : 60 498 t CO₂eq
 - T3A : 40 253 t CO₂eq

Total = 100 751 t CO₂eq

Ratio : 0,19 %

Références

192 t CO₂eq sur 3 ans = 205 kg CO₂eq par jour (hypothèse 312 jours travaillés par an avec 6 jours travaillés par semaine)

Soit consommation de 68 l de carburant / jour (1 litre diesel à 3 kg CO₂/l).

4.3 Conclusion

Analyse

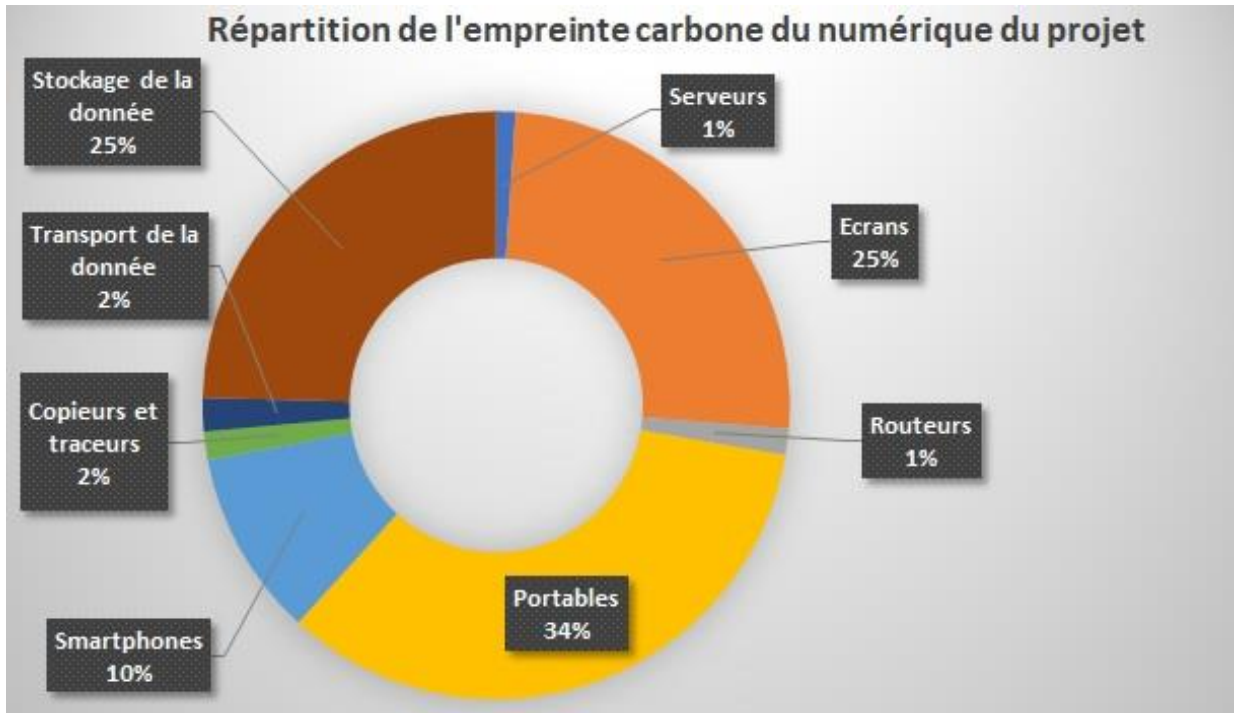
D'après les données de l'année 2021, l'impact carbone de l'ensemble du projet du Grand Paris Express est de l'ordre de 416 kt CO₂eq.

Les deux lots de construction de notre cas d'étude représentent un impact carbone de l'ordre de 45 kt CO₂eq, c'est-à-dire près de 11 % de la totalité des émissions du GPE, ce que l'on peut considérer comme représentatif.

D'autre part, nos cas d'étude représentent un montant de marché d'environ 1,3 Md€, montant très significatif d'un grand chantier de génie civil en région parisienne.

Le ratio final calculé (impact carbone du numérique en comparaison de l'impact carbone global) est donc de l'ordre de 0,2 %, qui peut être considéré comme très faible, puisqu'il est équivalent à la consommation journalière de 70 litres de gasoil, c'est-à-dire un plein d'un véhicule léger, sur un chantier qui utilise des centaines d'engins et de camions chaque jour.

Si l'on isole la part liée directement au BIM stricto sensu, c'est-à-dire aux équipements, leur fonctionnement et le stockage dédié spécifiquement au BIM, nous trouvons la valeur de **33 t CO₂eq** sur 3 ans soit un ratio de 0,03 %, l'équivalent de 12 l de carburant / jour.



Données globales

Stockage FR	400 g CO ² / Go / an	Emission d'un stockage de 1 Go / 1 an en France : environ 400 g CO ² / Go / an
Source :	Etude de l'université de Standford	
Transport Data	1.5 g CO ² / Go / 750 Km	Ratio flux 4G (orange) : 50.0 g CO ² /Go
Source :	xxx	
Empreinte électricité produite FR	58 g CO ² / Kwh	
Source :	International Energy Agency	

Données projet - GPE Ligne 15 Sud - Lots T2A et T3A

Durée en année	3	
Nbr personne.projet	77	100%
Volume données	19630 Go	(Maquette numérique)
Nombres de maquettes archivées sto	2	
Taille projets	39260 Go	
Taille moyenne usage	39260 Go	50
Distance au datacenter	750 Km	0.4
Empreinte carbone électricité	58 g CO ² / Kwh	(Produite en France)
Nbr de serveurs utilisés	6	
Nbr de routeurs	13	
Nbr d'écrans utilisés	247.7	
Nbr de portables utilisés	207	
Nbr de smartphones	304	
Nbr de copieurs et traceurs	3.6	
Installation des postes		(Temps homme !)

Tableau de synthèse

Empreinte Machines	Conso / machine	Total 1 an	Par projet
Serveurs	112 Kg CO ²	674 Kg CO ²	2022 Kg CO ²
Ecrans	65 Kg CO ²	16106 Kg CO ²	48318 Kg CO ²
Routeurs	71 Kg CO ²	924 Kg CO ²	2772 Kg CO ²
Portables	105 Kg CO ²	21754 Kg CO ²	65262 Kg CO ²
Smartphones	22 Kg CO ²	6540 Kg CO ²	19620 Kg CO ²
Copieurs et traceurs	275 Kg CO ²	988 Kg CO ²	2965 Kg CO ²

Empreinte flux transport	Consommation	Total 1 an	Par projet
Transport de la donnée	1.5 g CO ²	1178 Kg CO ²	3533 Kg CO ²

Empreinte stockage annuel	Consommation	Total 1 an	Par projet
Stockage de la donnée	400 g CO ²	15704 Kg CO ²	47111 Kg CO ²

Total empreinte CO2e	63868 Kg CO²	191604 Kg CO²
-----------------------------	--------------------------------	---------------------------------

Répartition de l'empreinte carbone du numérique du projet

Fig 27. Valeur et répartition de l'impact carbone du numérique sur les lots T2A et T3A

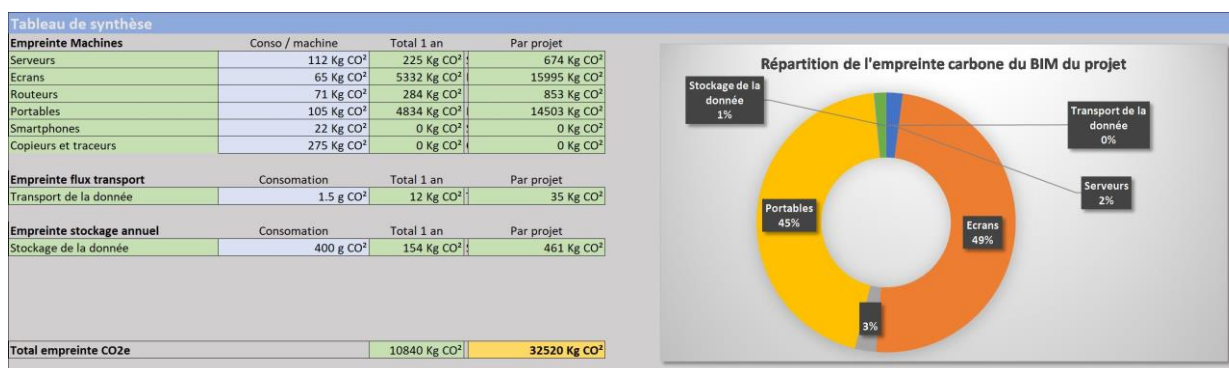


Fig 28. Valeur et répartition de l'impact carbone du BIM stricto sensu sur les lots T2A et T3A

Recommandations

Les postes numériques les plus impactants sont les ordinateurs portables (aux écrans de dimension modeste) et les écrans additionnels de grandes tailles nécessaires à la modélisation de modèles numériques 3D et aux simulations qui nécessitent l'affichage simultané de nombreuses sources d'information à mettre en cohérence.

En revanche, l'impact carbone des flux et du stockage des données utilisées et échangées reste marginal dans nos cas d'étude, même si de nombreuses utilisations n'ont pas pu être valorisées (utilisation des téléphones portables, des communications par réseaux sociaux, mais aussi de la fabrication des capteurs et de leur mise en œuvre, de la localisation GPS des engins, des organes de sécurité du chantier et des collaborateurs...).

C'est pourquoi nos recommandations sont plutôt orientées sur le matériel, c'est-à-dire une vigilance à accorder au dimensionnement (quantité et adéquation avec les réels besoins) des ordinateurs et des écrans supplémentaires, surtout avec la généralisation du télétravail qui a tendance à multiplier par deux le nombre d'écrans (sur site et chez le collaborateur).

Concernant les données, les recommandations portent sur la bonne analyse des besoins des utilisateurs, afin de ne transmettre que les données nécessaires à chacun et pas plus (le juste nécessaire et suffisant), afin de limiter les flux d'échange mais aussi pour ne pas perdre l'utilisateur dans un fouillis de données souvent mal structurées. Il est donc nécessaire d'anticiper les besoins des uns et des autres, en privilégiant la qualité plutôt que la quantité, et surtout en structurant l'information générée à transmettre et à stocker, pour faciliter sa recherche et sa réutilisation dans d'autres logiciels ou analyses.

Perspectives

Dans la mesure où le secteur de la construction doit diminuer drastiquement ses émissions de gaz à effet de serre d'ici 2050, aucune piste de progrès ne doit être négligée. L'utilisation raisonnée du numérique fait partie des efforts à fournir, surtout dans la mesure où ces technologies sont de plus en plus utilisées et que des volumes de données considérables sont captés chaque jour pour alimenter des DataLake et des DataWarehouse, afin d'alimenter des modèles d'analyse et de prédiction.

Ce qu'on ne sait pas évaluer actuellement, c'est la relation entre la montée en puissance des technologies numériques vis-à-vis des économies en émissions globales de gaz à effet de serre. Le bilan est-il positif ou non ?

D'autres cas d'étude devront donc être traités, dans la mesure où l'on peut récupérer les données nécessaires à ces analyses. En effet, la collecte des données est très difficile, en raison de la multitude d'acteurs, de gisements de données et de la nébuleuse du scope à prendre en compte.

5. DEUXIÈME CAS D'ÉTUDE : AMÉNAGEMENT URBAIN

5.1 Projet BHNS de Cayenne

Présentation du cas d'étude Le cas d'étude « aménagement urbain » concerne le projet BHNS de Cayenne (Bus à Haut Niveau de Service), durant sa phase de construction.

Hypothèses concernant la phase de construction

La phase de construction considérée s'étend de l'Ordre de Service des Travaux (OS) jusqu'à la livraison des ouvrages.

Les objectifs de l'étude

Les données d'entrée sont les suivantes :

- Bilan carbone des usages du numérique pendant la phase de construction.
- Bilan carbone du projet :
 - Ouvrage fini (matériaux, équipements...);
 - Construction de l'ouvrage (matériels utilisés, ressources mobilisées...).

Les objectifs de cette étude sont les suivants :

- Établir le ratio Bilan carbone des usages du numérique par rapport au bilan carbone complet du projet et de sa construction ;
- Estimer l'impact d'une démarche BIM sur les économies de carbone apportées au projet et à sa construction.

Présentation projet

- Le projet de BHNS de Cayenne est une double voie de Bus à Haut Niveau de Service en site propre continue de plus de 10 kilomètres, soit deux lignes qui vont desservir 21 stations.
- Le BHNS de Cayenne a pour objectif la restructuration du réseau existant pour offrir un mode de transport multimodal qui permettra :
 - La création d'un parking relais à Maringouins ;
 - La restructuration des réseaux de bus urbains et périurbains autour des pôles d'échanges et des deux lignes de BHNS structurantes ;
 - La création de liaisons douces en accompagnement du projet du BHNS afin de permettre le rabattement vers les stations.



Fig 29. Perspective de l'insertion des aménagements du BHNS de Cayenne

Organisation physique

Les deux lignes de transport collectif en site propre (TCSP) du BHNS de Cayenne relieront le centre de Cayenne (Marché) et le giratoire des Maringouins pour la première ligne, et le centre de Cayenne (Marché) au quartier de Mont-Lucas pour la deuxième.

- Le projet présente les caractéristiques suivantes :
 - 10,1 km et 21 stations (linéaire hors zones de retournement aux terminus);
 - Ligne A Marché- Maringouins : 5,58 km et 13 stations ;
 - Ligne B Place du Marché-Vieux Port - Mont-Lucas : 5,57 km et 11 stations;
 - Tronc commun Marché – Rond-point des pompiers : 1,03 km et 3 stations;
 - Deux pôles d'échanges aux terminus des lignes : Maringouins et Mont-Lucas ;
 - Un parc relais et un Centre de Maintenance et de Remisage (CMR) à Maringouins.
- Le projet de BHNS permet de desservir les principaux équipements de l'agglomération :
 - Le Marché et l'hypercentre de Cayenne ;
 - L'hôpital Rosemon ;
 - Le Jardin Botanique ;
 - L'Université de Guyane et son campus ;
 - Plusieurs collèges et lycées (Lycée Félix Eboué, Lycée Michotte, Collège Auxence Contout...).



Fig 30. Plan de situation avec découpage du tracé : 13 stations et polarités à proximité.

Échéances principales

- Dates principales
 - OS de démarrage des travaux : été 2020 ;
 - Date livraison prévue : été 2023.
- Avancement projet à fin février 2023 : 80 %

Main d'œuvre

Partenariat

- Partenaires du sous groupement réalisation du groupe IBYS :
 - Ribal Travaux Publics ;
 - Colas Projects.

Mobilisation

- Dans le cadre de la réalisation du projet, il y a **37 ETP** (équivalent temps plein), dont 10 sans matériel informatique.

Identification des collaborateurs

- Adresse électronique spécifique au projet :
 - Non.
- Authentification Windows sur un Domaine spécifique :
 - Non.

Bilan ACV

Dans le cadre de ce groupe de travail, un bilan ACV a été calculé à partir d'un fichier Excel dont les facteurs d'émissions proviennent de différentes sources, les quantités ont été extraites des données du déboursé.

Matériaux entrants

- Matériaux pris en compte pour les ouvrages réalisés : bétons, enrobés, granulats, aciers.

Le **total d'émissions estimé est de 23 725 t CO₂eq.**

Énergies

- Énergies prises en compte : électricité et carburants.

Le **total d'émissions estimé est de 15 256 t CO₂eq.**

Déchets et déblais

- Déchets pris en compte : déblais mis en décharge, déblais racheté, déblais mis en stock, remblais et remblais d'apport.

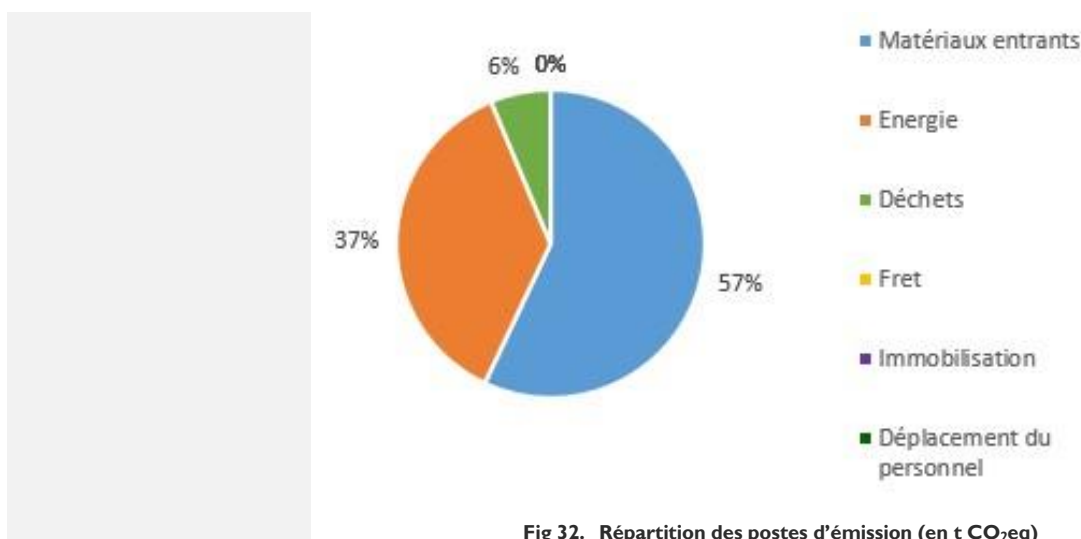
Le **total d'émissions estimé est de 2 621 t CO₂eq.**

Bilan carbone

Ci-après le récapitulatif des **émissions en tonnes équivalent carbone du BHNS de Cayenne.**

Poste	Emissions (tonnes eq CO ₂)
Matériaux Entrants	23 725
Energie	15 256
Déchets	2 621
Fret	-
Immobilisation	-
Déplacement du personnel	-
Total	41 602

Fig 31. Répartition des postes d'émission (en t CO₂eq)

Fig 32. Répartition des postes d'émission (en t CO₂eq)

Facteurs d'émission

Les facteurs d'émission utilisés proviennent de plusieurs sources, puisqu'aucune source ne possède l'ensemble des postes d'émissions à évaluer. Ceux choisis sont les mêmes que ceux du cas d'étude « tunnel » (cf. Fig 20).

Architecture informatique

Réseau Internet

Plateforme de collaboration interne

GED

Plateforme de collaboration Client

Matériels informatiques

- Raccordement au réseau fibre optique.
- Pour le projet, **une plateforme, interne**, de collaboration et stockage de données a été mise en place.
- SharePoint spécifique au projet :
 - Non.
- Serveurs dédiés :
 - Oui, un serveur.
- La GED a été gérée dans la plateforme de collaboration (voir plus haut).
- La plateforme de collaboration client est Mezzoteam.
- Il y a **27 PCs portables** et **un serveur**.
- Écran (type, nombre moyen / utilisateur) :
 - 21" ou 24" ;
 - **0,9 écran/utilisateur**.
- Tablette, téléphones professionnels :
 - **3 Ipads** ;
 - 38 lignes téléphoniques ;
 - Hypothèse : **1 téléphone professionnel par collaborateur**, même si de plus en plus de personnes optent pour un seul téléphone grâce aux esim et dual sim.
- Imprimante / Scanner :
 - **2 copieurs** multifonction ;
 - **1 traceur**.
- Autre (ex : casque VR) :
 - Non.

Données générées

Plateforme de
collaboration interne

Plateforme de
collaboration Client

- Volume de données de la plate-forme collaborative interne :
 - 753 Go.
- Volume de données Mezzoteam :
 - Sur 6 mois **123 Go**.
- Nombre fichiers par type et par phase (voir Fig 33) :

REPARTITION PAR TYPE	
Plans	0
Notes de calcul	251
Notes technique	421
Demandes d'agrément	414
Levées de points d'arrêt	191
Procédures d'exécution	61
REPARTITION PAR PHASE	
Avant-Projet Final	254
Études de Projet (PRO)	2616
Études d'Exécution (EXE)	2764
Essais	53
Documents généraux	950

Fig 33. Nombre de fichiers répartis par type et par phase de projet (Mezzoteam)

- Authentification spécifique pour livraison :
 - Oui.
- Demande d'un DOE numérique structuré :
 - Oui.

Messagerie

Serveur Outlook

Trafic de données

- Serveur Outlook dédié :
 - Non.
- Adresses e-mail dédiées au projet :
 - Non.
- Ci-après la somme des mails reçus et envoyés sur 6 mois incluant le nombre d'invitations aux réunions.

Sommes obtenues à partir de la liste des personnes⁴⁴ travaillant sur le projet quantifiant le nombre de mails qu'ils ont reçus et envoyés.

Somme de Send Count	Somme de Receive Count
81 030	3272

Fig 34. Somme des mails reçus et envoyés sur 6 mois

BIM

Contexte

Pour le projet BHNS de Cayenne une démarche BIM a été déployée durant la phase réalisation.

⁴⁴ Les personnes travaillant sur le projet de Cayenne travaillent exclusivement sur ce dernier.

Données

En plus de la plate-forme collaborative client (Mezzoteam) et de la plateforme collaborative interne projet, une plateforme collaborative BIM associée à une GED sur Sharepoint a été mise en place pour répondre aux besoins du projet.

- Volume total des données BIM (2D + 3D) dans SharePoint :
 - **36,94 Go.**
- Volume total des données BIM (2D + 3D) dans la plateforme collaborative BIM :
 - **4 Go.**
- Nombre d'utilisateurs de la plateforme BIM sur chantier :
 - **12 personnes.**
- Nombre de secteurs qui composent le projet :
 - **9 secteurs.**
- Nombre de secteurs modélisés :
 - **9 secteurs.**
- Nombre de disciplines modélisées :
 - **4 disciplines**, une maquette numérique par discipline (voieries, assainissement, multitubulaires, bordures).
- Nombre de maquettes numériques :
 - **36.**
- Nombre d'indice des maquettes par discipline :
 - **5 indices.**



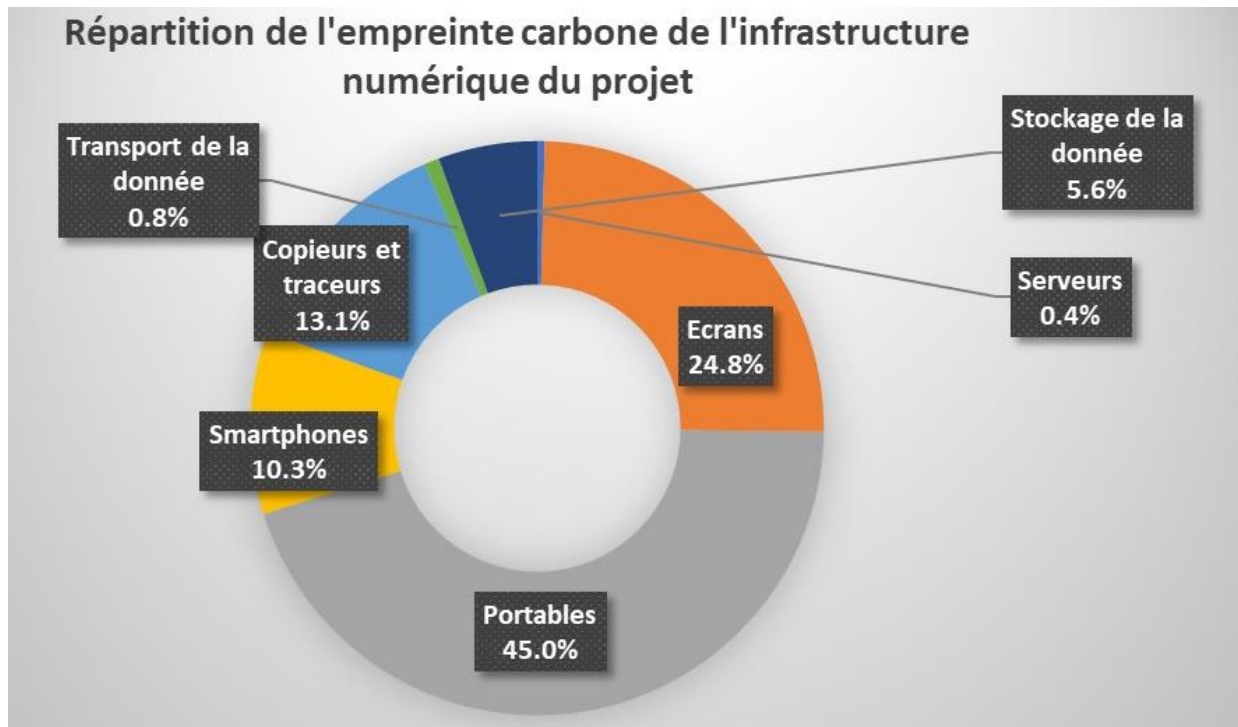
Fig 35. Maquette numérique du projet BHNS de Cayenne

5.2 Résultats et interprétations

Empreinte carbone sur la durée des travaux (2020-2023)

- Bilan carbone du digital du projet BHNS de Cayenne sur 3 ans :
 - **25 t CO₂eq.**
- Bilan carbone complet du projet (hors digital) :
 - **41 602 t CO₂eq.**
- **Ratio du numérique : 0,06 %.**

- Bilan carbone du BIM stricto sensu du projet BHNS de Cayenne sur 3 ans :
 - **8 t CO₂eq.**
- Bilan carbone complet du projet (hors digital) :
 - **41 602 t CO₂eq.**
- **Ratio du BIM : 0,02 %.**



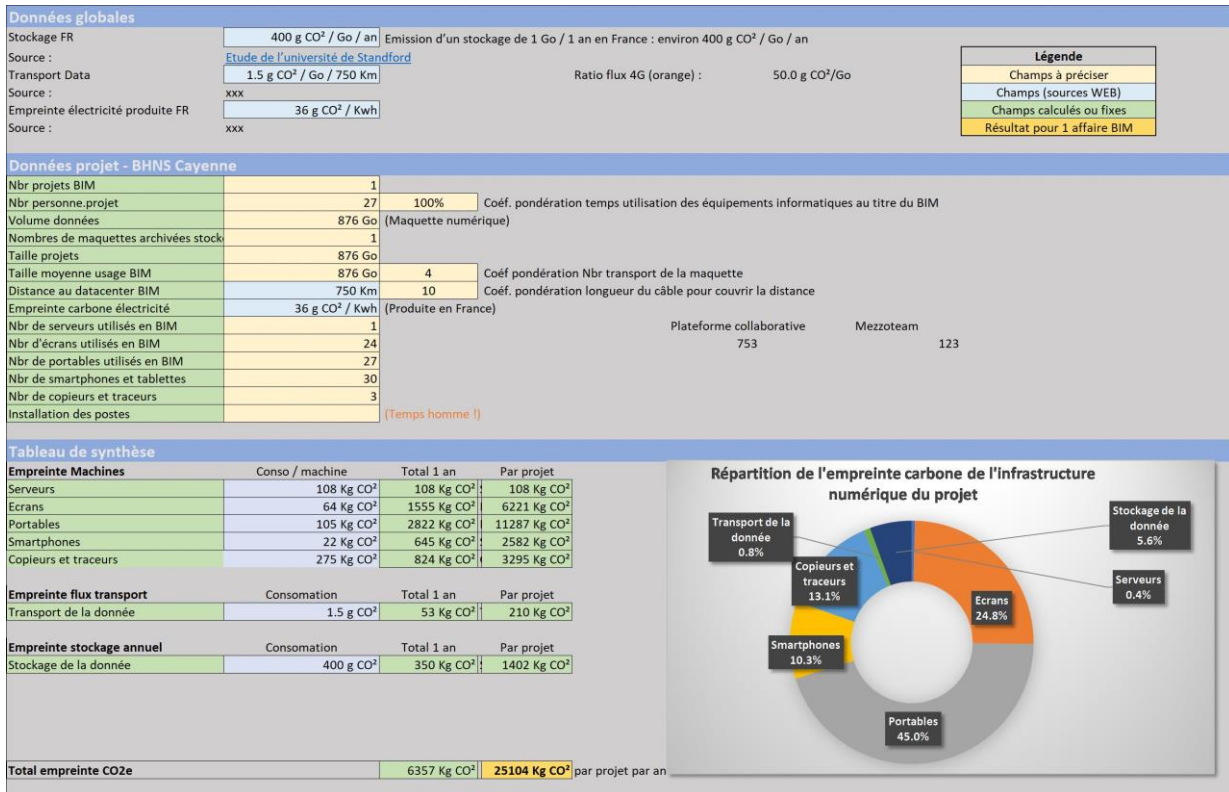


Fig 36. Valeur et répartition de l'impact carbone du numérique du projet BHNS de Cayenne

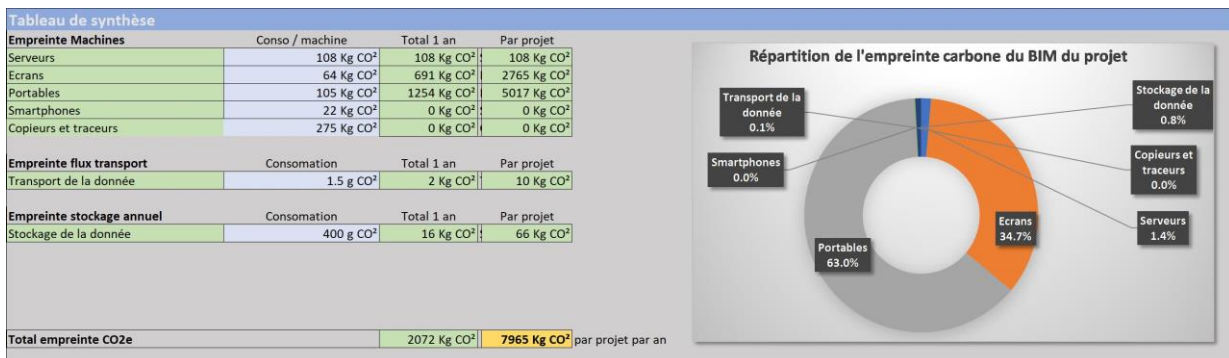


Fig 37. Valeur et répartition de l'impact carbone du BIM du projet BHNS de Cayenne

5.3 Conclusion

Analyse

D'après les données fournies plus haut, l'impact carbone de l'ensemble du projet du BHNS de Cayenne est de l'ordre de 41 602 t CO₂eq.

Le ratio final calculé (impact carbone du numérique en comparaison de l'impact carbone global) est donc de l'ordre de 0,06 %, qui peut être considéré comme très faible, puisqu'il est équivalent à la consommation journalière de 9 litres de gasoil, c'est-à-dire moins d'un plein d'un véhicule léger, sur un chantier qui utilise des centaines d'engins et de camions chaque jour.

Si l'on isole la part liée directement au BIM *stricto sensu*, c'est-à-dire aux équipements, leur fonctionnement et le stockage dédié spécifiquement au BIM, nous trouvons la valeur de 8 t CO₂eq sur 3 ans soit un ratio de 0,02 %, l'équivalent de 3 l de carburant / jour.

6. TROISIÈME CAS D'ÉTUDE : AUTOROUTE

6.1 Description du cas autoroutier

<p>Présentation du cas d'étude</p> <p>Hypothèses concernant les phases du chantier</p>	<p>Le cas décrit ci-après est tiré d'une étude réalisée pour le compte de la FNTP, lors d'un travail post-doctoral chez Eurovia, et menée en partenariat avec l'Université de Technologie de Compiègne (UTC). Elle a fait l'objet d'un article paru en janvier 2023⁴⁵. Nous nous contenterons ici de résumer les paramètres d'entrée ayant servi à estimer l'empreinte carbone du projet et du BIM et les résultats obtenus.</p> <p>Le cas traité concerne une autoroute française. Le nom de cette autoroute n'est pas précisé dans l'article, mais nous savons qu'elle est gérée par ASF (Autoroutes du Sud de la France) car cette entreprise est citée pour avoir contribué à la collecte des données d'auscultation et à l'utilisation du PMS (Pavement Management System). Nous notons également que le travail effectué implique Eurovia en tant que fournisseur de données liées à la construction de la chaussée et aux scénarii d'entretien.</p> <p>Les phrases de construction et de maintenance sont considérées. En revanche, la phase exploitation a été exclue de l'étude en raison de données manquantes sur la rugosité de la chaussée.</p>
<p>Les objectifs de l'étude</p>	<p>Cet article propose la première quantification environnementale de l'impact de la modélisation des informations du bâtiment (BIM) dans le secteur de la construction. Les émissions directes et indirectes de gaz à effet de serre (GES) générées par un BIM monofonctionnel pour planifier l'entretien des routes - un système de gestion des chaussées (PMS pour Pavement Management System) - sont évaluées à partir de données de terrain. Les empreintes carbone correspondantes sont calculées selon une approche du cycle de vie, en utilisant différentes sources de données - y compris ecoinvent v3.6 - et les facteurs de caractérisation GWP 100a du GIEC 2013.</p> <p>À travers une étude de cas, les éléments suivants sont examinés :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Quantifier l'empreinte carbone de la fonction PMS d'un BIM pour les infrastructures (I-BIM) à partir de données de terrain, • Quantifier l'empreinte carbone de trois alternatives de conception pour une route à fort trafic en France sur l'ensemble de son cycle de vie, • Comprendre les conséquences de l'utilisation de la fonction PMS d'un BIM sur la contribution de la construction et de l'entretien des chaussées au changement climatique, • Discuter des conséquences environnementales d'un BIM multifonctionnel.
<p>Présentation projet</p>	<p>L'étude de cas est menée sur une autoroute française théorique représentative, avec deux voies dans chaque direction, supportant un trafic de 500 poids lourds par jour et par direction (classe T1). Une section de 10 km de long conçue pour durer 30 ans est considérée, avec une largeur de 7 m par direction (hors accotements) correspondant à deux voies standards.</p>

⁴⁵ Anne de Bortoli, Yacine Baouch et Mustapha Masdan, « BIM can help decarbonize the construction sector: Primary life cycle evidence from pavement management systems », *Journal of Cleaner Production*, vol. 391, 2023, p. 136056. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623002147>, consulté le 4 avril 2023

Hypothèses sur la chaussée

La portance du sol lors de la mise en service de la chaussée est de classe PF2qs (80-120 MPa). Après 10 ans, il est supposé que 25 % du linéaire aura une portance diminuant vers une classe PF2 (50-80 MPa), 25 % une portance augmentant vers une classe PF3 (120-200 MPa) et les 50 % restants une portance maintenue à une classe PF2qs.

Scénarii d'entretien

Deux façons de concevoir les chaussées peuvent être envisagées en France : un aménagement définitif versus un aménagement progressif.

- Un aménagement définitif (scénario 1) est une approche qui consiste à concevoir une chaussée pour durer jusqu'à la fin de sa durée de vie sans renforcement structurel sous le trafic attendu. Dans ce cas, les opérations de maintenance sont seulement effectuées pour maintenir la surface de la chaussée en bon état : assurer l'étanchéité, une résistance au patinage conforme aux seuils de sécurité, et de bonnes conditions de conduite.
- Alternativement, un aménagement progressif (scénarii 2 et 3) est réalisé lorsque la chaussée n'est pas initialement conçue pour résister mécaniquement au trafic attendu sur toute sa durée de service et nécessite des opérations de maintenance de renforcement structurel qui restaureront en même temps de bonnes conditions de surface. Cette seconde approche nécessite l'utilisation de logiciels de conception mécanique-empirique (ME) et peut être choisie par les concessionnaires routiers pour optimiser les flux de trésorerie actualisés et réduire le risque de trafic.

Dans les scénarii 1 et 2, les défaillances prématurées des chaussées sont identifiées par patrouille régulière, c'est-à-dire par inspection visuelle effectuée par un personnel formé, souvent de la société de gestion des chaussées. En revanche, le scénario 3 nécessite une surveillance de la chaussée par un camion équipé qui mesure l'évolution de la capacité portante de la chaussée de l'autoroute. Ces données sont ensuite collectées et stockées dans une base de données. Une équipe de gestion des actifs de chaussée les analysera ensuite pour planifier les opérations de maintenance.

- Scénario 1 : basé sur le catalogue LCPC-Setra français ;
- Scénario 2 : conçu avec ODIN, le logiciel de conception ME d'Eurovia basé sur la même physique que le logiciel standard Alizé. La maintenance du scénario 2 est planifiée lors du processus de conception en considérant les prévisions de trafic et peut être modifiée ultérieurement avec des données de trafic ;
- Scénario 3 : géré avec Odin mais avec une connaissance parfaite de l'évolution de la chaussée, y compris le module de portance de la plate-forme, et la maintenance est optimisée en conséquence. Le scénario 3 consiste en une gestion de maintenance étayée par des données : elle repose sur des données de trafic, mais également sur des données d'état de la chaussée collectées, surveillées, stockées et analysées dans un PMS.

Échéances principales

L'article ne mentionne pas d'échéances. Nous déduisons de la lecture de l'article et de ses annexes que l'étude a été conduite au milieu de l'année 2021, que la durée de dimensionnement est de 30 ans et que les calculs relatifs à la maintenance de la chaussée s'étendent de 2021 à 2051.

Main d'œuvre

Aucune information n'est détaillée concernant le personnel impliqué dans la construction, l'entretien et la maintenance de l'autoroute considérée. Toutefois, nous savons que les observations de l'état de la chaussée (scénario 3) nécessitent l'intervention d'au moins un technicien. L'emploi du PMS requiert un chef de projet et d'autres acteurs non spécifiés dans l'article.

Bilan ACV

Une méthode est élaborée pour quantifier l'empreinte carbone des moyens les plus courants de concevoir, construire et entretenir les routes à fort trafic en France. La méthode est basée sur l'ACV, appliquée de manière cohérente avec les normes ISO 14040 et 14044 (Organisation internationale de normalisation, 2006a ; 2006b) qui permet la quantification de l'indicateur du changement climatique. Le système comprend les éléments suivants :

- La production de matériaux ;
- La construction des chaussées ;
- L'entretien des chaussées ;
- Les outils numériques potentiels ;
- L'étape d'utilisation de ces outils ;
- La réhabilitation des chaussées.

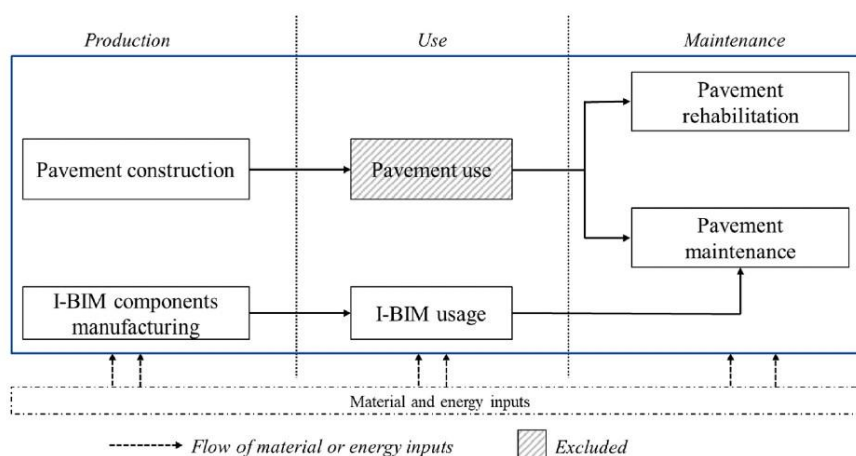


Fig 38. Limites de l'étude (le BIM ne concerne que le scénario 3).

Matériaux entrants

Les couches de fondation et de base sont construites avec de la grave bitume (GB3), sur des épaisseurs de 10 à 12 cm selon le scénario. L'enrobé appliqué en couche de roulement est du béton bitumineux semi grenu (BBSG), sur 6 cm d'épaisseur.

En phase d'entretien et suivant le scénario sélectionné, la chaussée peut être recouverte avec du béton bitumineux mince (BBM), du béton bitumineux très mince (BBTM) ou de l'enrobé coulé à froid (ECF). Leur facteur d'émission est calculé selon des données fournies par Eurovia.

Opérations d'entretien

Les scénarii 2 et 3 consistent en un recouvrement en surface de la chaussée par un enrobé sur des périodes de mise en service définies. Le scénario 1 demande un rabotage préalable du BBSG avant un rechargement d'une nouvelle couche de BBSG. L'opération de rabotage a été prise en compte dans l'évaluation de l'impact carbone du projet. Son facteur d'impact a été renseigné suivant des données d'Eurovia.

Énergies

Les opérations de maintenance et l'utilisation du PMS requièrent de l'électricité. La consommation électrique a été estimée à partir du facteur d'impact donné par l'ADEME (2020), sur la base d'un mix énergétique.

Bilan carbone

Phase construction (t0) :

- Scénario 1 : 39,04 kg CO₂eq/m² => 2 733 t CO₂eq sur toute la surface de la chaussée
- Scénarii 2 et 3 : 35,03 kg CO₂eq/m² => 2 452 t CO₂eq sur toute la surface de la chaussée

Réhabilitation (sur une durée de dimensionnement de 30 ans, phase de construction incluse) :

- Scénario 1 : 2,15 kg CO₂eq/m² => 150 t CO₂eq sur toute la surface de la chaussée
- Scénario 2 : 2,37 kg CO₂eq/m² => 166 t CO₂eq sur toute la surface de la chaussée

- Scénario 3 : $2,64 \text{ kg CO}_2\text{eq/m}^2 \Rightarrow 185 \text{ t CO}_2\text{eq}$ sur toute la surface de la chaussée
- Entretien (sur une durée de dimensionnement de 30 ans, phase de construction exclue) :
- Scénario 1 : $21,61 \text{ kg CO}_2\text{eq/m}^2 \Rightarrow 1\,513 \text{ t CO}_2\text{eq}$ sur toute la surface de la chaussée
 - Scénario 2 : $13,33 \text{ kg CO}_2\text{eq/m}^2 \Rightarrow 933 \text{ t CO}_2\text{eq}$ sur toute la surface de la chaussée
 - Scénario 3 : $11,31 \text{ kg CO}_2\text{eq/m}^2 \Rightarrow 792 \text{ t CO}_2\text{eq}$ sur toute la surface de la chaussée

Facteurs d'émission

Les facteurs d'émission utilisés proviennent d'Eurovia, dans le cas des matériaux, et de l'ADEME pour l'électricité.

Poste d'émission	Facteur d'émission	Source	Unité
BBTM 2,5 cm	4,0183	Eurovia	kg CO ₂ eq/m ²
BBM 4 cm	6,4292	Eurovia	kg CO ₂ eq/m ²
BBSG 5 à 7 cm	8,2859	Eurovia	kg CO ₂ eq/m ²
GB3 9 à 11 cm	13,3714	Eurovia	kg CO ₂ eq/m ²
ECF monocouche	1,2327	Eurovia	kg CO ₂ eq/m ²
Rabotage	2,5200	Eurovia	kg CO ₂ eq/m ²
Électricité	0,0599	ADEME	kg CO ₂ /kWh

Fig 39. Liste des facteurs d'émission et sources.

Architecture informatique

Réseau Internet

Matériels informatiques pour le suivi-maintenance

Le matériel utilisé ci-après ne concerne que le scénario 3, faisant appel à l'utilisation du BIM. Aucune information n'est donnée concernant le type de réseau employé. Le PMS a nécessité l'utilisation de :

- 3 serveurs (ProLiant BL 460 Gen10 et ProLiant BL 460 Gen9) ;
- 1 baie de stockage (3PAR 8200) ;
- 1 baie de sauvegarde (StorOnce 5500).
- 1 station fixe et 1 PC portable (HP Probook 650G2) ;
- 3 écrans 17" ;
- 1 clavier ;
- 1 souris.

La durée d'amortissement du matériel est de 5 ans.

Messagerie

Les envois et réceptions de mails n'ont pas été considérés dans ce cas d'étude.

Matériels chantier

Dans le cas du scénario 3, l'observation de l'état de la chaussée a mobilisé un curviamètre, c'est-à-dire un camion instrumenté pesant 13 tonnes sur son essieu arrière pour enregistrer la déformation sous cet essieu pour la collecte de données. Le calcul prend en compte la longueur de la section, le nombre de rondes de collecte de données et l'utilisation du véhicule.

BIM – PMS

L'empreinte carbone du PMS est calculée en prenant en compte les éléments suivants :

- Collecte de données ;
- Stockage de données ;

Collecte de données	<ul style="list-style-type: none"> Analyse de données. <p>La collecte est relative aux données récupérées du curviamètre. Les hypothèses sont les suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> 1 passage du camion/an ; Le camion est équivalent à un camion de 16 à 32 tonnes => d'après Ecoinvent v3.6, l'émission estimée est de 0,9264 kg CO₂eq/km.
Stockage de données	<p>Le stockage des données tient compte de l'architecture informatique (serveurs, baies de stockage et sauvegarde) décrite plus haut et des hypothèses ci-après :</p> <ul style="list-style-type: none"> Coefficient d'allocation de la base Argus aux opérations d'entretien = 1 ; Longueur totale de la chaussée dans les deux sens = 2737 km ; Durée de dépréciation de 5 ans.
Analyse de données	<p>L'analyse des données considère le traitement des activités numériques de toute l'équipe, composée de tâches locales avec des ordinateurs et le transfert de données depuis la base de données du PMS. La consommation d'énergie associée et le volume de données transférées pendant tout le cycle de vie de la chaussée sont quantifiés et convertis en empreinte carbone.</p> <p>Les activités associées aux tâches locales partent de l'hypothèse de 3 opérations de maintenance sur 50 ans et sur une section de 100 km. Ainsi, les paramètres de calcul pour l'empreinte carbone sont les suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> 40 jours de travail (chef de projet + autres acteurs) sur le logiciel de PMS sur les PC portables ; 15 jours de travail d'un technicien sur le logiciel de PMS sur la station fixe. <p>Pour le transfert des données, l'hypothèse prise est la même que pour les tâches locales, soit environ 1 opération tous les 15 ans. Le volume de données est donc estimé à 50 GB.</p>

6.2 Résultats et interprétations

Empreinte carbone pour les trois scénarii

Les scénarii 2 et 3 émettent respectivement 19 % et 22 % de moins de CO₂eq que le scénario 1. Cela représente des économies de 961 et 1076 t CO₂eq pour la section de 10 km de long sur 30 ans. L'impact direct de l'utilisation du PMS - par exemple, la fabrication du matériel numérique, l'infrastructure et le véhicule de collecte de données ainsi que leur fonctionnement et l'utilisation du logiciel - est mis en évidence en rouge dans la figure. L'impact direct du PMS est négligeable par rapport aux émissions de construction et de maintenance de la chaussée. Mais une maintenance adaptée grâce au PMS dans le scénario 3 réduit de 3 % supplémentaires les émissions de GES de la chaussée sur son cycle de vie par rapport à un schéma de maintenance non basé sur les données (scénario 2).

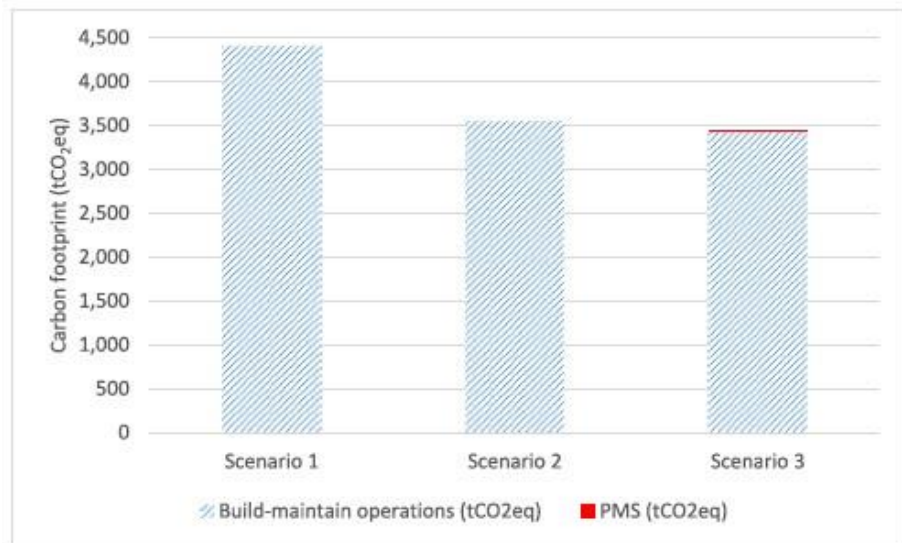


Fig 40. Empreinte carbone suivant le scénario sélectionné

Le GWP du PMS est de 520,7 kg CO₂eq. La collecte de données est le plus grand contributeur à l'empreinte carbone du PMS, avec 53,4 % de l'impact total. Le stockage des données contribue presque également, avec 46,3 % contribuant au GWP total. L'utilisation du PMS elle-même est responsable d'une quantité négligeable de gaz à effet de serre (0,3 %). Les activités de planification de maintenance proviennent de tâches locales (87,6 %) et de transfert de données.

	GWP (kg CO ₂ eq)	Contribution	Sub-contribution
PMS - total	520.8		
Data storage	241.1	46.3%	
<i>Of which: hardware</i>	6,5		2.7%
<i>Of which: running</i>	234.5		97.3%
Data collection	277.9	53.4%	
Maintenance planning	1.7	0.3%	
<i>Of which: local task</i>	1.5		87.6%
<i>Of which: transfer task</i>	.2		12.4%

Fig 41. Contribution des différents postes à l'impact carbone

- Bilan carbone du PMS :
 - **0,5 t CO₂eq.**
- Bilan carbone complet du projet (hors digital) :
 - **Scénario 1 : 4 396 t CO₂eq.**
 - **Scénario 2 : 3 551 t CO₂eq.**
 - **Scénario 3 : 3 429 t CO₂eq.**
- **Ratio du BIM (scénario 3) : 0,02 %.**

6.3 Conclusion

Analyse

L'article discute de l'analyse d'impact du système de gestion des chaussées (PMS, pour Pavement Management System) sur l'empreinte carbone de la planification de l'entretien des chaussées. L'étude montre que l'empreinte carbone du PMS est négligeable par rapport à celle des opérations de construction des chaussées. Cependant, la moitié des émissions du PMS sont dues à la collecte de données et

l'autre moitié à leur stockage. Cela implique que l'utilisation de capteurs pour collecter des données plutôt que de réaliser des relevés avec des véhicules à moteur à combustion interne pourrait aider à réduire l'empreinte carbone de la fonction de planification de l'entretien d'un I-BIM.

L'étude suggère que des incertitudes surviennent à chaque étape d'une ACV et que des études complémentaires sont nécessaires pour confirmer les résultats de cette étude. Les variations dans la collecte de données du PMS, la gestion des données et l'utilisation des logiciels dans le monde entier doivent également être prises en compte.

De plus, l'étude propose que l'I-BIM puisse être utilisé pour optimiser les chaussées au fil du temps en fonction de critères souhaités, tels que la minimisation des émissions de carbone. La surveillance en temps réel des conditions de la chaussée par instrumentation et l'utilisation de ces données dans un I-BIM pour simuler l'évolution structurelle au fil du temps peuvent faire progresser considérablement la gestion de l'entretien par rapport aux programmes actuels de simulation structurelle.

L'utilisation d'un PMS est bénéfique pour le climat sur l'ensemble du cycle de vie lorsque la capacité portante de la chaussée s'améliore au fil du temps, et neutre pour le climat dans le cas contraire. Les économies d'émissions de GES grâce à l'utilisation du BIM peuvent atteindre jusqu'à 14 et 30 % des émissions du cycle de vie par rapport au cas où le BIM n'est pas utilisé.

Nous avons noté des différences significatives de valeurs de référence entre cet article et celles utilisées dans les autres cas d'étude. En s'alignant sur ces références, nous obtiendrions un ratio de 0,2 % soit 10 fois plus mais sans impact majeur sur la conclusion, à savoir que le poids de l'empreinte BIM est négligeable au regard des gains en CO₂ que le BIM permet d'obtenir.

7. CONCLUSIONS

Conclusions générales

L'un des objectifs du groupe de travail GT0.5 était d'évaluer l'impact carbone du numérique, et en particulier du BIM, par rapport à l'impact global d'un projet d'infrastructure sur quelques cas d'étude de projets récents (tunnel, aménagement urbain, autoroute). Le tableau ci-après récapitule les pourcentages d'émissions CO₂ pour les deux premiers cas (le dernier étant tiré d'un travail réalisé antérieurement à la constitution de notre groupe de travail).

	Cas d'étude "tunnel"	Cas d'étude "aménagement urbain"
émissions en T eq CO ₂ projet	100 751	41 602
émissions en T eq CO ₂ numérique projet	192	25
émissions en T eq CO ₂ BIM projet	32.520	7.965
% émissions eq CO ₂ numérique/projet	0.190%	0.060%
% émissions eq CO ₂ BIM/projet	0.032%	0.019%
% émissions eq CO ₂ BIM/numérique	17%	32%

Fig 42. Impact carbone du numérique et du BIM sur les projets d'infrastructure – Cas d'étude « tunnel » et « aménagement urbain ».

Étant donné la difficulté de collecter l'ensemble des données des processus numériques déployés sur les cas d'étude considérés, et étant donné la complexité de définir le périmètre exhaustif de tous les facteurs impactant ces processus numériques, notre étude est sans aucun doute incomplète et inexacte. Mais, même si nos résultats ont une marge d'erreur de 100 %, nous pouvons considérer que le bilan carbone du numérique mis en œuvre sur un grand projet de construction (particulièrement consommateur de technologies numériques) est négligeable par rapport au bilan carbone du projet considéré, quelle que soit sa phase de développement. En effet, les cas d'étude traités sont particulièrement significatifs, mais nos résultats mériteraient à être consolidés avec d'autres exemples afin de confirmer nos conclusions.

Un des enjeux de notre réflexion était d'évaluer si l'utilisation des nouveaux processus numériques sur un projet de construction permettait de maîtriser, voire de faire baisser, le bilan carbone global de ce projet. Nos recherches n'ont pas permis de répondre à cette attente, étant donné que nous n'avons pas de cas d'étude de référence qui autoriserait à comparer un même cas d'étude « sans technologie numérique » et un cas d'étude « avec ».

Quoi qu'il en soit, nous pouvons affirmer que le numérique est un levier digital primordial pour piloter la trajectoire bas carbone du secteur de la construction, afin de satisfaire les objectifs que la profession s'est imposée, dans la mesure où les quelques recommandations suivantes sont suivies.:

- Dimensionner au plus juste le volume des équipements informatiques ;
- Limiter le nombre d'équipements par personne (1 seul téléphone, 1 ordinateur portable ou 1 tablette...);
- Maximiser la durée de vie des équipements informatiques et recycler ;

Au niveau du hardware

Au niveau du software**Vis-à-vis des données****Au niveau des processus****Au niveau de l'infrastructure informatique**

- Favoriser la réutilisation des anciens équipements informatiques pour des activités annexes ou moins gourmandes afin de mieux amortir le coût initial de production du matériel.
- Utiliser des plateformes collaboratives qui permettent les échanges de données en mode différentiel ;
- Réfléchir aux synchronisations automatiques entre les différentes plateformes collaboratives & GED du projet afin de gérer fidèlement les versions de fichiers.
- Mettre en place un DataLake (données non structurées issues de capteurs) et un DataWarehouse (données structurées issues du BIM) pour les futures Data Sciences ;
- Privilégier des données qualitatives plutôt que des volumes importants de données peu fiables ;
- Préparer les processus d'archivage en début de chantier (lorsque les décideurs sont encore présents) afin de sélectionner uniquement les données nécessaires à l'exploitation et à la maintenance (volumes de données parfois gigantesques mais sans utilité réelle, plan de classement non adapté qui ne permet pas de retrouver facilement les données recherchées...) ;
- Mener une réflexion, en amont du projet, sur les besoins d'informations nécessaires pour répondre aux demandes des différents acteurs afin de réduire les flux de données inutiles .
- Transmettre uniquement les données nécessaires au destinataire ;
- Utiliser des plateformes collaboratives et des GED pour éviter les échanges par courriel de pièces jointes (en particulier les maquettes numériques). Attention toutefois à ne pas multiplier les GED. Ou alors essayer de « synchroniser » les GED ;
- Éviter les transformations de données d'un format dans un autre (privilégier les processus openBIM et formats ouverts de données, comme les IFC).
- Sélectionner les plateformes cloud en fonction de leur localisation ou de leurs sources d'approvisionnement en électricité ;
- Promouvoir l'IoT fonctionnant sur des « réseaux bas débit » lorsque les contraintes d'acquisition de données (volume, fréquence, contrôle) le permettent

Ainsi, nous avons prouvé que l'empreinte carbone intrinsèque du BIM est négligeable vis-à-vis de l'empreinte carbone des projets. En revanche, il apparaît que le BIM pourrait être un moyen efficace pour réduire et contrôler les émissions de GES sur les projets, sous réserve que l'on intègre beaucoup mieux et que l'on enrichisse les données carbone via les PropertySet des IFC qui sont aujourd'hui largement sous-utilisées. Nous préconisons un travail pour mieux intégrer cette composante dans les outils BIM.

8. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ADEME, *Economie circulaire - L'analyse du cycle de vie. Mis à jour le 2 octobre 2018*, <https://expertises.ademe.fr/economie-circulaire/consommer-autrement/passer-a-l'action/dossier/lanalyse-cycle-vie/a-quoi-sert-acv>, consulté le 31 mars 2023.
- ADEME, Territoires & Climat, *BEGES*, <https://www.territoires-climat.ademe.fr/ressource/120-40>, consulté le 31 mars 2023.
- Bordage Frédéric, *Empreinte environnementale du numérique mondial*, Etude Green.iT, version 2.0, 2019.
- De Bortoli Anne, Baouch Yacine et Masdan Mustapha, « BIM can help decarbonize the construction sector: Primary life cycle evidence from pavement management systems », *Journal of Cleaner Production*, vol. 391, 2023, p. 136056.
- buildingSMART International Limited, *IFC 4.3.x*, <https://ifc43-docs.standards.buildingsmart.org/>, consulté le 31 mars 2023.
- buildingSMART International Limited, *8.10.4.5 Pset_MaterialFuel*, https://ifc43-docs.standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4x3/HTML/lexical/Pset_MaterialFuel.htm, consulté le 31 mars 2023.
- CEA, *Qu'est-ce que l'effet d'albedo ? 28 octobre 2015*, <https://www.cea.fr/multimedia/Pages/videos/culture-scientifique/climat-environnement/webdoc-climat/qu-est-ce-que-l-effet-d-albedo.aspx>, consulté le 31 mars 2023.
- CEREMA, *L'analyse de cycle de vie, un outil pour l'écoconception. Webinaire du 1er février 2022*, <https://www.cerema.fr/fr/actualites/analyse-du-cycle-vie-outil-ecoconception-webinaire-du-1er>, consulté le 31 mars 2023.
- Cigref, The Shift Project, *Sobriété numérique - Une démarche d'entreprise responsable*, 2020.
- CIMBéton, *PERCEVAL - Eco-comparateur des structures routières*, 2022.
- Dupeyron Jean-Philippe et Langlois-Salazar Valentina, « Les infrastructures au service de la neutralité carbone et de l'adaptation au changement climatique », *Dossiers Economiques*, vol. 169, mai 2021, coll.« Fédération Nationale des Travaux Publics - Territoires & Infrastructures », p. 16-20.
- European Commission, *Strategic Plan 2020-2024 - Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and Small and Medium-sized Enterprises (DG Grow)*, Ref. Ares(2020)7470664, 2020.
- European Commission, *Strategic Plan 2020-2024 - DG Climate Action*, Ref. Ares(2020)4936136, 2020.
- Fédération Nationale des Travaux Publics, *Les Travaux Publics s'engagent pour le climat - Construire les infrastructures autrement : la trajectoire bas carbone des Travaux Publics*, 2021.
- Idir Rachida, « L'analyse de cycle de vie, un outil pour l'écoconception », Webinaire du CEREMA, 2022.
- IDRRIM, *VARIWAYS v2.1 (Module Construction)*, Avis technique N°163, 2016.
- IDRRIM, *SEVE - Système d'Évaluation de Variantes Environnementales V2*, Avis technique N°160, 2013.
- IDRRIM, *VARIWAYS - L'éco-comparateur de variantes routières V 1.1*, Avis technique N°159, 2013.
- IDRRIM, *ECORCE - ECOcomparateur Routes Construction Entretien V2.0*, Avis technique N°158, 2013.
- International Panel on Climate Change (IPCC), *Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change*, Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022.
- Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires - Ministère de la Transition énergétique, *Cheminement d'un grand projet routier réalisé en maîtrise d'ouvrage publique*, 2022.
- NF EN 15804+A2, *Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Déclarations environnementales sur les produits - Règles régissant les catégories de produits de construction*, Collections AFNOR, 2019.
- NF EN 17412-1, *Modélisation des informations de la construction - Niveau du besoin d'information - Partie 1 : concepts et principes*, Collections AFNOR, 2020.
- NF EN ISO 14040, *Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes et cadre*, Collections AFNOR, 2006.

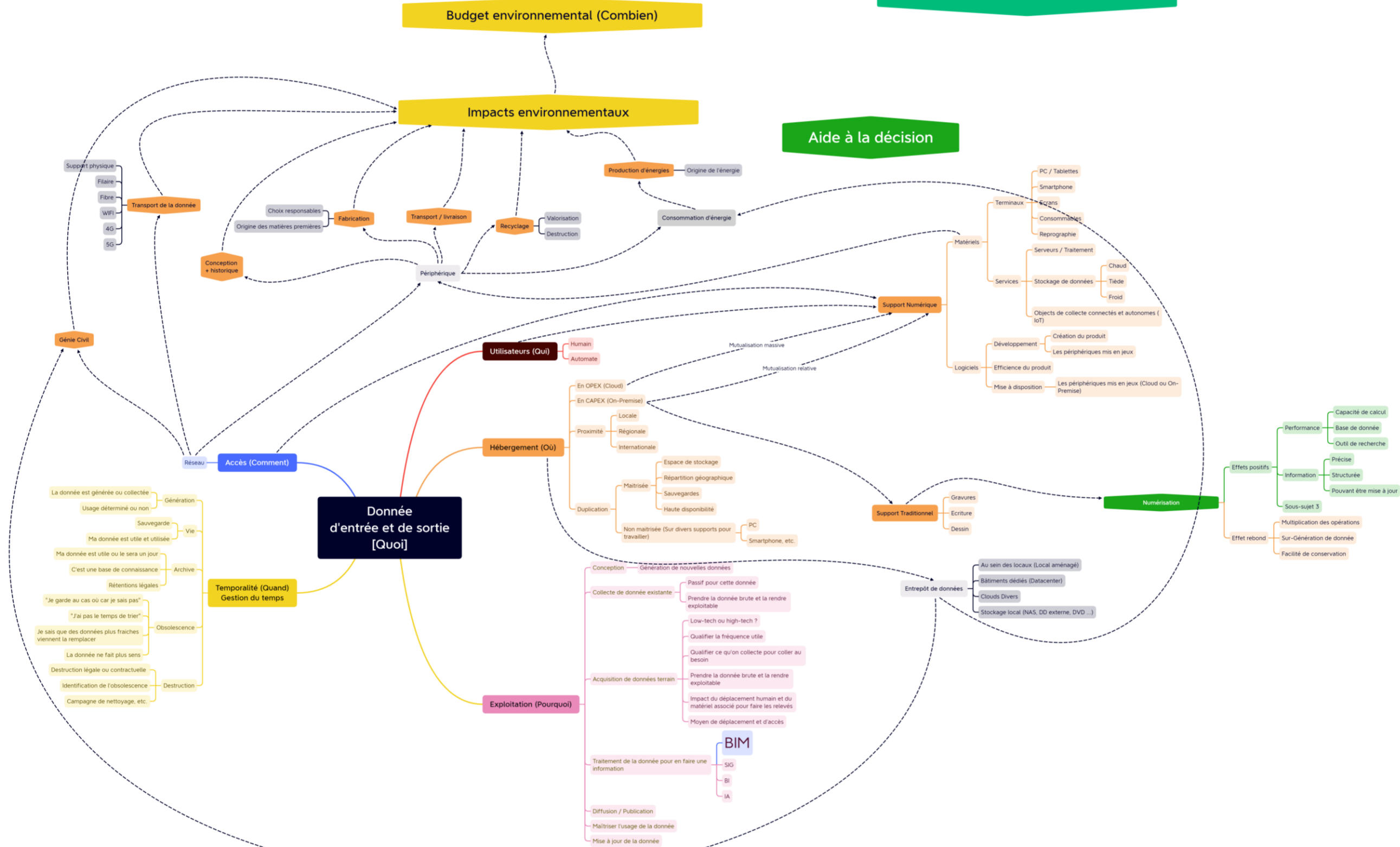
- NF EN ISO 14044, *Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Exigences et lignes directrices*, Collections AFNOR, 2006.
- NF EN ISO 16739, *Classes de fondation d'industrie (IFC) pour le partage des données dans le secteur de la construction et de la gestion des installations*, Collections AFNOR, 2016.
- NF EN ISO 19650-1, *Organisation et numérisation des informations relatives aux bâtiments et ouvrages de génie civil, y compris modélisation des informations de la construction (BIM) - Gestion de l'information par la modélisation des informations de la construction - Partie 1 : concepts et principes*, Collections AFNOR, 2018.
- Organisation for Economic Co-operation and Development, *Fighting climate change: International attitudes toward climate policies*, OECD Economics Department Working Papers No. 1714, 2022.
- Pinsard Maxime et Toussaint Julien, « L'impact environnemental du numérique au Québec et au Canada », *Shifters Montréal, 2e rapport du projet DiagnosTIC*, 08/2020 p.
- Samsung, *Global Harmony with People, Society & Environment*, Samsung Sustainability report, 2016.
- The Green Web Foundation, *Is your website hosted green? Green Web Checker*, <https://www.thegreenwebfoundation.org/green-web-check/>, consulté le 2 février 2023.
- The Shift Project, *La résilience des territoires - Pour tenir le cap de la transition écologique*, Tome 1, 2021.
- United Nations, *Framework Convention on Climate Change*, FCCC/CP/2022/10/Add.1, 2023.
- United Nations, *Framework Convention on Climate Change*, FCCC/CP/2015/10/Add.1, 2016.
- Youmatter, *Forçage radiatif: définition, origines et impact sur le climat. Mis à jour le 5 juin 2020*, <https://youmatter.world/fr/definition/forcage-radiatif-definition-origines-impact-sur-le-climat/>, consulté le 31 mars 2023.
- Ziyani Layella, Benning Pierre, Dony Anne, Jacquet Jean-Pierre, Ammad Imane, Negishi Koji, Douceron Thierry, Guizol Maud, Montaignac Renaud de et Levent Anne-Laure, « Carbon impact of digital tools used in an infrastructure project », *InfraBIM Open*, Tampere, Finlande, 30 janvier-1er février 2023.

9. ANNEXES

9.1 Représentation des données et de leurs dépendances

Vision CQQCOQP

Aide à la décision



9.2 Exemple d'éco-comparateur - Présentation de SEVE

SEVE ECO-COMPARATEUR - BRICE DELAPORTE 30/11/2022

ECO-COMPARATEUR SEVE-TP



- › Logiciel d'aide à la décision pour réduire les impacts environnementaux des infrastructures
 - Apporte un cadre objectif à la comparaison de l'empreinte environnementale des projets
 - Phase DCE / Phase d'étude (module simplifié ECOPRO) / phase EXE
- › Développé pour la profession
 - Maîtrise d'ouvrage et AMO
 - Maîtrise d'œuvre
 - Entreprises de travaux
- › Vérifié par un organisme tiers
- › Avis technique IDRRIM



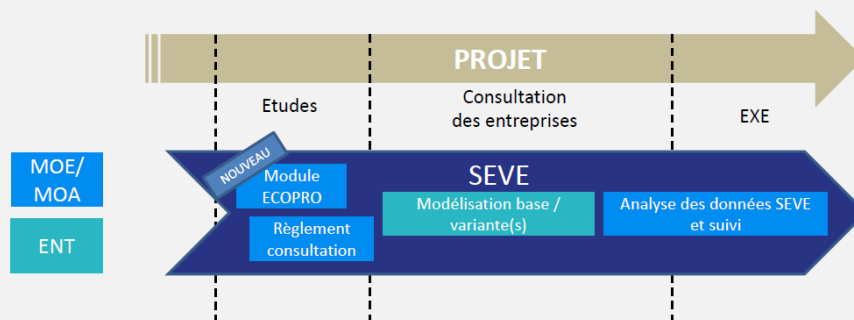
2



SEVE ECO-COMPARATEUR - BRICE DELAPORTE 30/11/2022

QUAND UTILISER SEVE ?

- › Phase d'étude (module simplifié ECOPRO) / Phase DCE / Phase d'EXE



3



INTÉRÊTS DE SEVE

Pour l'entreprise de travaux



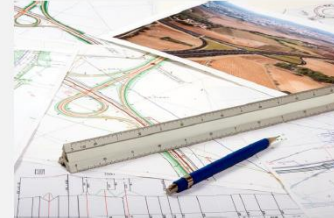
permet **d'optimiser** d'un point de vue environnemental les solutions techniques qu'il propose au maître d'ouvrage en solution de base ou en solutions variantes (lorsque le règlement de consultation du marché le permet)

Pour le maître d'ouvrage



apporte une réelle **simplification de la comparaison** et donc du choix de l'offre la plus intéressante lors de la phase de sélection des offres, selon des critères environnementaux qui lui sont propres

Pour le bureau d'étude



l'éco-comparaison en phase de conception permet de favoriser la prescription de solutions plus vertueuses d'un point de vue environnemental

4



PÉRIMÈTRE D'UTILISATION

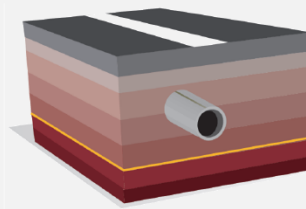


5



SEVE ECO-COMPARATEUR - BRICE DELAPORTE 30/11/2022

BASE DE DONNÉES



- Couches de surface (Roulement, liaison et accrochage)
- Couches d'assise (Base et fondation)
- Couche de forme
- Arase
- PST
- Déblais / Remblais

› Base de données générale
(validée par une organisme neutre)

- Matériaux-type
- Transport
- Engins de chantier
- Etc.



› Base de données propre à chaque entreprise, à créer

- Matériaux / formules
- Usines
- Ateliers de mise en œuvre
- Etc.

6



SEVE ECO-COMPARATEUR - BRICE DELAPORTE 30/11/2022

BASE DE DONNÉES SEVE : SOURCES

- › Fiches de données environnementales et sanitaires (FDES) **collectives** ou modules d'informations environnementales (MIE) **collectifs, i.e. représentatifs de matériaux génériques**
 - ex : granulats (UNPG), bitume (Eurobitume), ciment (ATILH)
- › Bases de données environnementales
 - Base carbone ADEME (ex : carburants)
 - INIES (ex : ISDI, ISDND)
 - Ecoinvent (ex : produits chimiques)
- › Collectes de données
 - Matériels de transport
 - engins



7



INDICATEURS



9.3 Tableau récapitulatif des éco-comparateurs – Fonctionnalités, domaines d’application et indicateurs mesurés

	Fonctionnalités	Domaines d’application	Indicateurs
ECORCE	<ul style="list-style-type: none"> Évaluation des impacts environnementaux de différentes solutions techniques alternatives (phase amont) ; Proposition de solutions environnementales alternatives (base ou variante) (phase de remise des offres) ; Eco-comparaison en valeur relative du poids environnemental des différentes solutions techniques proposées par les entreprises (phase d’analyse des offres) ; Bilan environnemental des travaux exécutés (phase aval de la réalisation de l’ouvrage). 	Infrastructures routières	<ul style="list-style-type: none"> Émissions de GES (CO₂eq) Consommation énergétique (MJ) (énergie procédé) Consommation de matériaux y compris alternatifs (agrégats d’enrobés...) Consommation théorique d’eau Acidification Toxicité chronique Consommation d’eau Écotoxicité Eutrophisation Ozone photochimique
SEVE	Comparaison de l’impact environnemental de chantiers d’infrastructures routières en construction et entretien.	<ul style="list-style-type: none"> Infrastructures routières Voiries urbaines Assainissement Terrassements 	<ul style="list-style-type: none"> Consommation énergétique, Émissions de GES Tonne kilométrique Préservation de la ressource (avec les granulats naturels, agrégats d’enrobés valorisés, matériaux recyclés, et déblais) Gestion de l’eau (optionnel) Prise en compte de la biodiversité (optionnel)
VARIWAYS		<ul style="list-style-type: none"> Phase travaux des différents ouvrages (GES) Exploitation de l’infrastructure hors interventions de maintenance et surveillance (consommations énergétiques) 	<ul style="list-style-type: none"> Émissions de gaz à effet de serre (GES) Consommation énergétique Évaluation économique des émissions de GES
PERCEVAL	Comparaison économique et environnementale sur le cycle de vie complet (phase construction + phase entretien)	<ul style="list-style-type: none"> Chaussées ; Aménagements routiers ; Ouvrages annexes. 	<ul style="list-style-type: none"> Émissions de GES, Consommation d’énergie Épuisement des ressources naturelles Consommation d’eau Acidification de l’air Eutrophisation de l’eau

	Fonctionnalités	Domaines d'application	Indicateurs
ORIS	<ul style="list-style-type: none"> • ACV systématique et complète sur l'ensemble des étapes du cycle de vie : <ul style="list-style-type: none"> • Production des matériaux ; • Construction ; • Exploitation (maintenance, effet albedo, excès de consommation de carburant de véhicule, carbonatation, éclairage) ; • Fin de vie ; • Charge et bénéfice liés à la revalorisation des déchets. • Comparaison de plusieurs solutions techniquement équivalentes 	Infrastructures liées	<ul style="list-style-type: none"> • Coût global • Émissions de GES, • Consommation d'énergie • Coût économique • Durabilité • Consommation de ressources naturelles locales

9.4 Extrait DCE du Grand Paris Express



6.5.2 Extraction des quantités du Reporting Bilan Carbone

Dans le cadre du reporting des bilans carbone il est attendu du Titulaire qu'il renseigne certains tableaux à partir des informations issues de la maquette (cf. *Notice de Management de Projet - Exigence Spécifique Marché §Reporting Bilan Carbone*). Ces extractions portent en premier lieu sur les volumes de béton et d'aciers qui constituent le *Bilan Carbone Cœur* (BCC) de chacun des ouvrages.

Ces éléments, modélisés et identifiés par leur codification au sein de la maquette (cf. §10.3.9), devront également porter deux paramètres :

- *SGP-BC-Reference* :
 - Ce paramètre assure la liaison entre les valeurs de *Numéro de formulation béton* et *Numéro de type d'acier*, respectivement présents dans les onglets *Référentiel bétons* et *Référentiel aciers hors armatures* du *Reporting BCCœur*. Par exemple :
 - B001, Bnnn : Référentiel béton, ligne n
 - A001, Annn : Référentiel acier, ligne n
 - C001, Cnnn : Référentiel complémentaire, ligne n
 - NA : Elément volontairement renseigné hors périmètre
- *SGP-BC-Statut* :
 - Ce paramètre renseigne le niveau actuel de validation de l'information, en particulier et a minima aux jalons en gras, tels que par exemple :
 - BCC conception en cours
 - BCC issus de la conception PRO2
 - BCC réalisation en cours
 - BCC définitif

Suivant la proposition du Titulaire, un processus analogue pourra être appliqué pour assurer une liaison avec le *Reporting bilan carbone complémentaire* demandé.

Le Titulaire est responsable de tenir à jour les différentes valeurs que peuvent prendre chacun des paramètres pour chacun des objets présents dans les maquettes sur la base de leurs identifiants respectifs.

Le Titulaire prendra soin d'identifier explicitement les éléments qui sont exclus du périmètre de ses bilans carbone.