

SECTION CHASSENEUIL - ROUMAZIÈRES

RAPPORT D'ÉVALUATION DE L'EMPREINTE CARBONE DU PROJET

Version 0.1

Première diffusion le 25/05/2023 - Olivier Carles – Objectif carbone

Seconde diffusion suite retour DREAL - le 19/06/2023 – Olivier Carles – Objectif carbone

SOMMAIRE

1. Introduction et méthodologie3
2. Postes d'émission de la phase construction : **37 500 tonnes équivalent CO₂**5
 - 2.1. Changement d'affectation des sols : **8 700 tonnes équivalent CO₂**6
 - 2.2. Terrassements : **13 500 tonnes équivalent CO₂**7
 - 2.3. Ouvrages d'art : **2 750 tonnes équivalent CO₂**9
 - 2.3.1. Préalable méthodologique9
 - 2.3.2. Les ouvrages d'art courants10
 - 2.3.3. Les ouvrages d'art non courants12
 - 2.4. Chaussées : **7 800 tonnes équivalent CO₂**13
 - 2.5. Assainissement : **1 750 tonnes équivalent CO₂**13
 - 2.6. Equipements : **3 200 tonnes équivalent CO₂**14
3. Postes d'émission de la phase exploitation et entretien :15
 - 3.1. Trafic : un supplément de **10 000 tonnes équivalent CO₂ sur 50 ans**.15
 - 3.2. Trafic : hypothèses techniques retenues – détail du calcul15
 - 3.3. Entretien et exploitation : **5 100 tonnes équivalent CO₂ sur 50 ans**17
 - 3.4. Autonomie énergétique du projet :18
4. Pistes de réduction19
 - 4.1. Ouvrir le projet à des variantes répondant aux mêmes objectifs lors des phases de consultation des entreprises.19
 - 4.2. Changement d'affectation des sols20
 - 4.3. Terrassements20
 - 4.4. Ouvrages d'art21
 - 4.5. Chaussées21
 - 4.6. Assainissements22
 - 4.7. Equipements22
5. Conclusion23

Dans le cadre du projet d'aménagement de la RN 141 en 2x2 voies, une estimation de l'empreinte carbone de la construction et de l'exploitation a été confiée au cabinet spécialisé Objectif Carbone.

L'empreinte carbone recense l'ensemble des incidences du projet sur l'effet de serre au sens le plus large.

La présente étude considère le projet de création d'une voie rapide 2x2 voies en guise de déviation de l'actuel RN 141 entre Chasseneuil et Roumazières, sur un parcours de 9,35 km.

1. Introduction et méthodologie

Le consensus sur l'urgence de réduire fortement les émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique nécessite de mesurer l'empreinte carbone de tout nouveau projet pour en faire un des éléments de décision. Parce qu'elle permet aussi d'identifier les principaux postes d'émissions et leurs causes, la mesure de l'empreinte carbone aide aussi à identifier les actions utiles pour diminuer ces émissions.

A partir de notre expérience d'évaluation carbone pour de grands projets d'infrastructures de transport, la construction du profil carbone demandé à ce stade du projet se base sur la méthode Bilan Carbone®. A partir des données fournies, les flux de matière et d'énergie nécessaires à la construction de l'infrastructure, à sa maintenance, mais aussi liées à son usage (véhicules motorisés) sont identifiés, listés et quantifiés, sous forme d'unités d'activité. A chaque fois que cela est nécessaire pour compléter les données actuellement disponibles, des hypothèses sont émises et clairement exposées, de façon à ce que l'empreinte carbone puisse facilement être réévaluée lorsque ces données seront ultérieurement complétées, affinées ou modifiées. A chaque unité d'activité est associée un facteur d'émission.

Les principaux facteurs d'émission qui structurent les évaluations détaillées dans les chapitres 2 et 3 qui suivent, sont :

- Carbone organique du sol lors d'un changement d'affectation de celui-ci, exprimé en tCO₂e/ha
- Terrassements, exprimés pour chacune des activités de ce métier en kg CO₂e/m³
Ceux-ci dépendent principalement de 3 facteurs d'émission que sont l'usage des carburants (3,2 kg CO₂e/m³), l'usage de chaux (1 040 kg CO₂e/t) et l'usage de liant hydraulique routier (600 kg CO₂e/t)
- Béton des ouvrages d'art et des ouvrages d'assainissement, variant de 250 à 370 kg CO₂e/m³ selon les dosages en ciment.
- Aciers d'armatures du béton (1 700 kgCO₂e/t), aciers de charpentes (2 150 kgCO₂e/t), aciers galvanisés d'équipements (3 670 kg CO₂e/t)
- Enrobés routiers, variant de 48 à 55 kg CO₂e/t pour les enrobés classiques.
- Trafic, exprimé en kg CO₂e/VL.km et en kg CO₂e/PL.km
- Entretien routier, exprimé en kg CO₂e/m².an

Nous effectuons les calculs de l'empreinte carbone dans un tableur de calcul où nous décomposons l'ensemble des émissions dans 8 onglets distincts :

- Changement d'affectation des sols
- Terrassements
- Ouvrages d'art
- Assainissements
- Chaussées

- Equipements routiers
- Trafic routier (usage)
- Entretien et fin de vie de l'infrastructure

Les premières lignes de chacun de ces onglets précisent – lorsqu'il y a lieu – les hypothèses qui se retrouvent dans ce rapport.

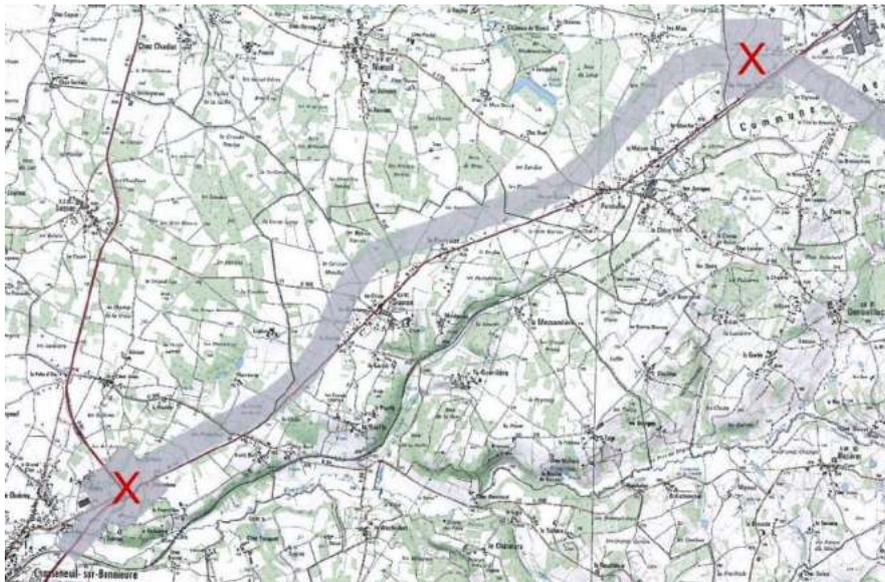
Dans un neuvième onglet, nous présentons une évaluation de la quantité d'énergie consommée sur cette section lorsque le parc routier sera 100% électrifié.

Enfin, dans un dixième onglet, nous présentons la synthèse des calculs et la répartition des différentes contributions.

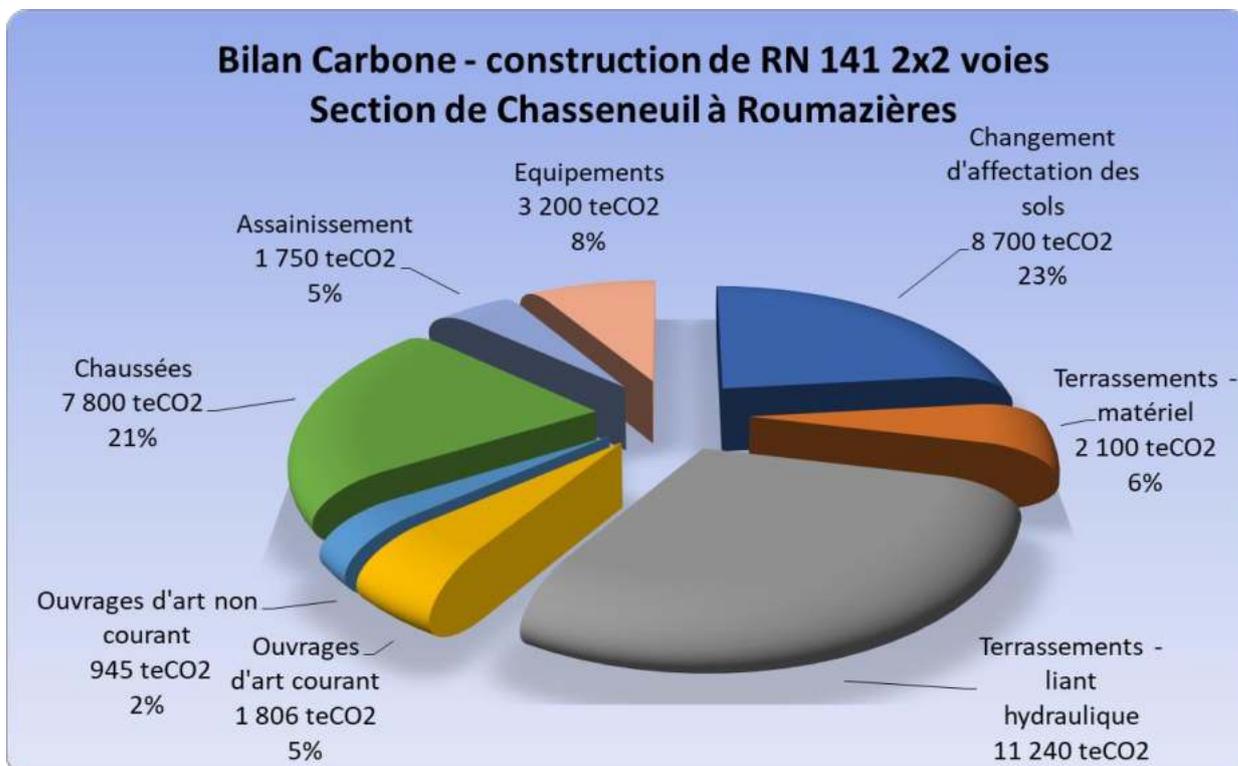
Le présent rapport restitue les hypothèses et les résultats des calculs du tableau.

Aussi, le rapport met en perspectives les émissions induites par le projet de construction-exploitation avec celles induites par les nouvelles conditions de circulation, il établit également une comparaison avec la situation existante.

Il permet ainsi d'évaluer la pertinence du projet en regard du service rendu et des attendus de la Stratégie National Bas Carbone élaborée par la France pour répondre notamment aux engagements de l'accord de Paris.



2. Postes d'émission de la phase construction : 37 500 tonnes équivalent CO₂



Ce chiffrage correspond aux travaux suivants :

(Sauf précision spécifique, les données sont toutes extraites du document « Rapport de synthèse PRO_RN141_CHRO_PRO_V0_modif_14_Oct22 »)

- La construction d'une chaussée 2x2 voies sur une plateforme de 24m60 de largeur sur 9,35 km de long, soit 230 000 m².
- 93,5 ha d'acquisition foncière sur la base d'une emprise standard de 100 m de largeur. 30% seront imperméabilisées par les chaussées et cunettes. Selon Google Earth, 25 % du tracé correspond à des zones boisées, 65% à des surfaces de cultures, et 10% à de la prairie permanente.
- Le décapage de 198 000 m³ de terre végétale, l'excavation de 425 105 m³ de déblais et la mise en œuvre de 631 744 m³ de remblais (section courante, ouvrage d'art, rétablissement de communication et merlons inclus).
- La construction de 5 ouvrages d'arts courants (3 Passages Inferieurs – PI, 2 Passages supérieurs – PS),
- La construction d'un ouvrage d'art non courant (le viaduc de la Bonniere qui sera doublé pour accueillir la 2x2 voies)
- La construction de 12 ouvrages hydrauliques et d'un réseau d'assainissement.
- Des équipements de sécurité (glissières simples de chaque côté et glissières béton centrale DBA) et clôtures sur les 9,35 km de section courante.

2.1. Changement d'affectation des sols : **8 700 tonnes équivalent CO₂**

Les sols stockent du carbone dans leur composition. Ces quantités, ainsi que les cinétiques des échanges de carbone entre les sols et l'atmosphère, ont notamment été étudiées par l'INRA au début des années 2000. Selon le type de sol, la quantité de carbone stocké par unité de surface varie.

Nous avons utilisé ici l'outil ALDO de l'ADEME (disponible en ligne sur <https://aldo-carbone.ademe.fr/epci/200072049>) qui permet d'évaluer la séquestration de carbone dans les sols et la biomasse sur le territoire national, en adoptant pour chaque territoire (à l'échelle des EPCI), les spécificités locales.

Les valeurs retenues ici pour décrire les stocks de carbone séquestrés (sols + litière + biomasse) sont les suivantes (source ALDO pour la communauté de commune de Charente Limousine) :

- Forêt de feuillu : 182 tC/ha = 667 tCO₂e/ha
- Prairies – zones herbacées : 71 tC/ha = 257 tCO₂e/ha
- Culture : 50 tC/ha = 183 tCO₂e/ha
- Sols artificiels imperméabilisés : 30 tC/ha = 145 tCO₂e/ha

Lors d'un changement d'affectation, une fois les terres retournées, la lumière et le contact de l'air stimulent une activité bactérienne qui libère vers l'atmosphère le carbone qui était contenu dans la matière organique.

L'imperméabilisation des sols empêche les activités biologiques qui permettent d'y restocker du carbone.

La mise en végétation permet un retour du carbone dans le sol dans le temps, valable tant pour un retour à l'état sauvage que pour une artificialisation non imperméabilisée (pelouses, parcs et jardins).

Dans le cas qui nous occupe, certaines zones de forêts, de prairies et de cultures seront imperméabilisées (chaussées/cunettes), ou rendues à l'état de prairies herbacées.

Les données d'entrée prises en compte sont les surfaces d'emprises nécessaires pour la réalisation du projet.

L'emprise du projet totalise 95 hectares d'emprises, réparties comme suit pour caractériser la situation initiale (répartition réalisée à partir de l'analyse des photos satellites) :

- 23 ha de forêt
- 11 ha de prairies permanentes
- 61 ha de cultures

En situation finale, en première approximation, le projet totalisera 230 000 m² de chaussées, (soit 23 ha) et 40 000 m² de cunettes béton et bassins de rétention étanches, soit un total de 27 ha imperméabilisés. Le reste reviendra à terme une surface végétalisée permettant un stockage carbone équivalent à une prairie.

Pour le calcul de l'empreinte carbone, la surface imperméabilisée a été répartie équitablement sur ces trois types de sols initiaux au prorata de leurs surfaces respectives, ce qu'on présente dans le tableau ci-dessous.

Surface (ha)	Etat initial	Etat final	f.e. (tCO ₂ eq/ha)	Contribution GES
3 ha	Prairie permanente	Chaussée/surface imperméabilisée	150	457 tCO ₂ e
8 ha	Prairie permanente	Zone végétalisée	-	0 tCO ₂ e
6 ha	Forêt de feuillu	Chaussée/surface imperméabilisée	557	3 612 tCO ₂ e
16 ha	Forêt de feuillu	Zone végétalisée	407	6 683 tCO ₂ e
17 ha	Culture	Chaussée/surface imperméabilisée	73	1 263 tCO ₂ e
44 ha	Culture	Zone végétalisée	- 77	-3 360 tCO ₂ e
95 ha				8 654 tCO ₂ e

Les mesures compensatoires prises pour la sauvegarde de la biodiversité peuvent également avoir une incidence sur le stock de matières organiques dans les sols. Il s'agira d'une évolution progressive qui agira pendant environ 30 ans avant de se stabiliser dans un nouvel équilibre. Le guide méthodologique du CEREMA pour la prise en compte des enjeux carbone des projets routiers, indique les enjeux suivants :

Type de mesure compensatoires	Facteur d'émission annuel	Durée de validité	Delta de stock final (gain = négatif)
Culture vers prairie	-1,80 tCO ₂ eq/ha/an	30 ans	-54 tCO ₂ e/ha
Culture vers forêt	-1,61 tCO ₂ eq/ha/an	30 ans	-48 tCO ₂ e/ha
Prairie vers forêt	-0,37 tCO ₂ eq/ha/an	30 ans	-11 tCO ₂ e/ha

Ainsi, selon le type de mesure prise, les enjeux de long terme (sur 30 ans) pour environ 150 ha de mesures compensatoires prévu dans le cadre du projet routier et en prenant l'hypothèse d'un facteur d'émission annuel moyen de -1 tCO₂eq/ha/an, on peut atteindre un bénéfice d'environ 4 500 tCO₂eq.

Le tableau récapitulatif par milieu ci-dessus démontre qu'il convient de prendre garde à bien choisir le type de surface pour ses mesures compensatoires, pour optimiser cette séquestration. En l'absence d'orientation disponible à ce stade, nous n'intégrons pas d'impact CO₂, ni positif ni négatif lié aux mesures compensatoires.

2.2. Terrassements : 13 500 tonnes équivalent CO₂

Les principaux postes d'émission relatifs à ce poste sont le carburant, la chaux et les liants hydrauliques.

Pour une première approche par les volumes de mouvement de terre, des ratios calculés par le CEREMA avec le logiciel Ecorce V2 et communiqués dans les *Recommandations pour l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre des projets routiers* permettent de se guider à partir des principales étapes d'un chantier de terrassement.

Les volumes pris en compte sont extraits de la « Notice terrassements RN141_CHRO_PRO_V1_7172023.pdf ».

Les principales données d'entrées prises en compte se résument comme suit :

- Décapage de la terre végétal pour 197 681 m³
- 425 105 m³ de déblais, dont
 - 261 605 m³ extraits section courante
 - 44 712 m³ extraits des rétablissements
 - 37 601 m³ de bassin de rétention
 - 37 596 m³ extraits des fouilles d'ouvrages d'art
 - 19 854 m³ de purges de PST
- 631 742 m³ de remblais sont mis en œuvre, dont
 - 247 015 m³ en remblais sur la section courante (SC)
 - 141 774 m³ de base drainante sur la SC
 - 104 876 m³ de merlons
 - 68 711 m³ pour les rétablissements
 - 23 496 m³ pour les ouvrages d'art
- 72 517 m³ extraits des déblais sont mis en dépôt définitif
- 285 270 m³ de matériaux d'apport sont nécessaires pour compléter le mouvement de terre :
 - 120 000 m³ d'apport pour réaliser les remblais de la section courante
 - 165 270 m³ de matériaux d'apport extérieurs sont nécessaires pour la base drainante et les blocs techniques des ouvrages d'art.
- 96 235 m³ de déblais seront traités à la chaux pour être réutilisé en remblais. Nous prenons l'hypothèse d'un taux de 3% de chaux.
- Nous prenons également comme hypothèse que 100% de la PST est traitée sur 50 cm de profondeur, à hauteur de 2,5% en masse. 70% le sera avec de la chaux et 30% avec du liant routier.

Ainsi, à partir de ces volumes, nous avons mené le raisonnement par étapes successives qui est récapitulé dans le tableau ci-dessous :

Mouvement de terre	Quantité (m3)	f.e. (kg eq CO2/m3)	Contribution GES (T eq CO2)	Part de contribution au mouvement de terre
Décapage	197 681 m3	0,761	150 teCO2	7%
Extraction interne	425 105 m3	0,761	324 teCO2	15%
Transport interne	351 738 m3	1,76	619 teCO2	29%
Mise en œuvre des matériaux interne (en remblais)	351 738 m3	0,274	96 teCO2	5%
Traitement interne (50% de la PST et de la structure de chaussée + remblais)	211 240 m3	0,161	34 teCO2	2%
Evacuation externe (mise en dépôts dé- finitifs)	73 367 m3	0,274	20 teCO2	1%
Evacuation des excédents (transport sur 5 km)	73 367 m3	0,88	65 teCO2	3%
Extraction apport externe	285 270 m3	0,761	217 teCO2	10%
Transport apport (sur 10 km)	285 270 m3	1,76	502 teCO2	24%
Mise en œuvre apport externe (rem- blais, base drainante, bloc techniques)	285 270 m3	0,274	78 teCO2	4%
			2 105 teCO2	100%

Cela donne une contribution totale des mouvements de terre de 2 105 tonnes équivalent CO₂.

Pour la vérification croisée, on notera que pour 710 000 m³ excavés en tout, l’empreinte carbone de 2 105 tonnes équivalent CO₂ correspond à 658 m³ de carburant, ce qui donne un ratio de 0,93 litres par mètre cube de terrassement, proche de la valeur 1 habituellement constatée.

Pour ce qui est des produits de traitement appliqués, nous avons suivi les indications de volume et de taux de traitement du descriptif du projet, conjugués aux facteurs d’émission suivants :

- 1 040 kg eq CO₂ par tonne de chaux vive, valeur issue de la Base Carbone®
- 600 kg eq CO₂ par tonne de liant hydraulique routier, valeur moyenne issue d’une étude menée récemment sur une famille de liants hydrauliques routiers à partir de leur composition.

Les calculs qui ont été menés sont reportés dans le tableau ci-dessous :

Traitement	Quantité de terre (m3)	Masse volumique remblais (t/m3)	Quantité de terre à traiter (tonnes)	Taux de traitement (% massique)	Quantité chaux/liant (T)	f.e. (kg eq CO ₂ /T)	Contribution GES Traitement (T eq CO ₂)
Traitement des matériaux issues des déblais	96 235	2	192 470	3,0	5 774	1 040	6 010
Chaux	80 504	2	161 007	2,5	4 025	1 040	4 190
Liant hydraulique routier	34 502	2	69 003	2,5	1 725	600	1 040
							11 240 teCO₂

Cela donne une contribution totale des produits employés pour le traitement de 11 240 tonnes équivalent CO₂.

2.3. Ouvrages d’art : 2 750 tonnes équivalent CO₂

2.3.1. Préalable méthodologique

Leur construction met en œuvre des matériaux dont la fabrication amont est fort émettrice en gaz à effet de serre : acier pour les armatures et les charpentes métalliques, ciment (clinker principalement) pour les bétons.

Les émissions liées à la fabrication du clinker ont les mêmes causes que ce qui est exposé au paragraphe précédent pour les liants hydrauliques et la chaux. Selon le taux de clinker dans le ciment, le facteur d’émission de ce dernier est plus ou moins élevé, les valeurs les plus courantes s’étalent entre 600 et 800 kg d’équivalent CO₂ par tonne.

L’extraction et la transformation des roches pour en faire des granulats, le malaxage du béton, les divers transports, et même l’élaboration des adjuvants, ont une contribution minoritaire dans les facteurs d’émission globaux des bétons (le plus souvent entre 10% et 15%). Ces contributions sont bien intégrées aux facteurs d’émissions des bétons utilisés ci-après.

Compte-tenu du dosage et du type de ciment employé, diverses valeurs probables ont été retenues comme hypothèse pour les ouvrages du projet. Ces simulations à partir des propriétés attendues des bétons correspondent aux moyennes nationales données par le configurateur BETie du SNBPE.

Les émissions liées à l'élaboration de l'acier sont principalement dues à l'élaboration de la fonte par réduction de l'oxyde de fer (présent dans le minerai) par du carbone (utilisation de coke). La Base Carbone® accorde à cet acier neuf un facteur d'émission de 2 211 kg équivalent CO₂/tonne. La filière recyclage pour l'élaboration de l'acier consomme essentiellement de l'électricité. Elle est beaucoup moins émettrice, surtout lorsque l'électricité employée est peu carbonée. En France, le facteur d'émission est de 938 kg équivalent CO₂/tonne.

La filière du recyclage des aciers permet de fournir en France 40% du volume total d'acier mis sur le marché. C'est pourquoi nous retenons pour l'acier d'armatures un facteur d'émission moyen composé à 40% d'acier recyclé et à 60% d'acier neuf, soit une valeur de 1 700 kg équivalent CO₂ par tonne.

L'acier de charpente comprend la matière première, mais aussi une part significative induite par le façonnage en atelier (chauffage, chute de ferraille, transport) qui se rajoute à la fourniture d'acier brut.

A partir de bilan carbone d'ateliers de charpente métallique que nous avons audités précédemment, nous chiffrons ces compléments d'émission comme suit :

- Gâche liée au façonnage-découpage : de 10% (identifié très précisément sur des pylônes de ligne THT 400 kV) à 15% pour des objets particulièrement complexes.
- Chauffage des ateliers, électricité, process de façonnage : 15% (basé sur le bilan carbone récent d'une usine).

Par conséquent, le facteur d'émission pour les charpentes métalliques est évalué à 2 150 kg équivalent CO₂ par tonne.

Enfin, le retour d'expérience de chiffrages détaillés d'ouvrages de génie civil nous indique un supplément pour « frais généraux carbone ». Ils prennent en compte les autres postes d'émission tels que l'usage de l'énergie et des transports pour la construction, les ouvrages provisoires, les coffrages, et les fournitures diverses ainsi que les équipements. On retient ici une valeur de 15% de la contribution liée aux matériaux « béton + acier ».

2.3.2. Les ouvrages d'art courants

Le projet comporte au total 5 ouvrages courants, dont 3 PI et 2 PS.

Pour le dimensionnement des passages supérieurs (PS), nous avons considéré des tabliers de section équivalente à une dalle pleine d'épaisseur 70cm + 2 longrines de 60cm de large par 25cm d'épaisseur (pour des tabliers de 8m de large). Chaque ouvrage sera associé à deux culées de 8mx1,8mx1,5m.

Les murs garde-grève, murs en retour et dalles de transition sont simulés par un ajout de 20 m³ par ouvrage. Nous faisons également l'hypothèse d'un taux moyen d'armatures de 200 kg/m³ pour le tablier et de 100kg/m³ pour les appuis.

Les PS intégreront une pile correspondant à un chevet de 8mx0,5mx0,8m, ainsi qu'un voile de 6mx0,6mx5m sur une semelle enterrée de 10mx2mx1m

Pour le dimensionnement des passages inférieurs (PI), nous avons considéré des cadres fermés de 70 cm d'épaisseur, de 8 m d'ouverture et de 5 m de hauteur utile.

Les murs garde-grève, murs en retour et dalles de transition sont simulés par un ajout de 20 m3 par ouvrage. Nous faisons également l'hypothèse d'un taux moyen d'armatures de 200 kg/m3 pour le cadre et de 100kg/m3 pour les autres éléments.

Les types de bétons :

Nous supposons enfin l'usage de bétons suivants :

C35/45 CEM III/A pour les semelles pour 157 kgCO₂e/m3

C35/45 CEM II/A-L pour les élévations pour 269 kgCO₂e/m3

C35/45 CEM I pour les tabliers et longrines pour 303 kgCO₂e/m3

Les données d'entrée disponibles à ce stade du projet sont :

Nom de l'ouvrage	Longueur (m)	Largeur de chaussée (m)	Surface (m2)
PS RD366	48	8	384
PS RD739	68	10	682
PI RD951	26	10	260
PI RD365	26	8	195
PI RD60	26	8	195
Total	194	9	1 717 m²

La contribution aux émissions de gaz à effet de serre des matériaux de construction des ouvrages courants est récapitulée dans le tableau ci-dessous :

Surface OAC (m2) - PS	Tablier béton armé	Appuis sauf fondations béton armé	Fondations béton armé	Total béton	Armatures acier	Charpente métallique	Frais généraux carbone
1 067 m ²	787 m3	169 m3	40 m3	995 m3	178 T	0 T	15%
Contribution élémentaire (T eq CO2)	238 tCO2	45 tCO2	6 tCO2	290 tCO2	303 tCO2	0 tCO2	89 tCO2

Contribution Matériaux de construction OAC (T eq CO2)	682 tCO2
--	-----------------

Surface OAC (m2) - PI	Cadre béton armé fermé	Murs garde grève, autre	Fondations béton armé	Total béton	Armatures acier	Charpente métallique	Frais généraux carbone
650 m ²	1 479 m3	60 m3	0 m3	1 539 m3	302 T		15%
Contribution élémentaire (T eq CO2)	448 tCO2	16 tCO2	0 tCO2	464 tCO2	513 tCO2	0 tCO2	147 tCO2

Contribution Matériaux de construction OAC (T eq CO2)	1 124 tCO2
--	-------------------

Soit un total PS + PI de 1 806 tCO₂e.

Nous disposons ainsi de 5 OAC ayant une surface moyenne de 342 m² (533 m² moyen pour les PS et 217 m² moyen pour les PI), réalisés chacun avec 507 m³ de béton armé à un taux ferrailage de 189 kg/m³ (498 m³ de béton en moyenne pour les PS et 513 m³ pour les PI). Leur profil carbone moyen est de 1052 kgCO₂e/m² et de 361 tCO₂e / OA avec une forte disparité entre les PS et les PI :

- 639 kgCO₂e / m² PS et 341 tCO₂e / PS ;
- 1 729 kgCO₂e / m² PI et 375 tCO₂e / PI ;

2.3.3. Les ouvrages d'art non courants

Pour l'ouvrage d'art non courant (doublement du viaduc de la Bonnieure), nous avons considéré l'ajout d'un ouvrage mixte à simple tablier avec un hourdis d'épaisseur 30cm sur 2 PRS (hauteur 3m, largeur 1m, épaisseur moyenne 25mm), sans prendre en compte à ce niveau d'approche, ni d'entretoises, pièces de pont ou de diaphragmes. Nous prenons en compte la largeur totale de 9,75m, ainsi que deux longrines de 25cm de hauteur et de 60cm de large.

Les appuis sont pris en compte par la pile type décrite ci-après, avec le ratio d'une pile pour 500 m² de viaduc : un chevêtre de 10mx3mx3m sur un fût creux de 3 m de diamètre et de 30 cm d'épaisseur, sur 20 m de hauteur, le tout posé sur une semelle de 10mx10mx1m. 2 culées-type complètent l'ouvrage, avec un sommier de 16mx5mx2m. Ne sont pas pris en compte à ce niveau d'approche, le mur garde-grève, le mur en retour, ni les dalles de transition. Nous faisons également les hypothèses de taux moyen d'armatures 100 kg/m³ pour les appuis et de 250kg/m³ pour les hourdis et longrines.

Nous supposons enfin l'usage de bétons suivants :

C35/45 au CEM III/A pour les semelles et culées pour 157 kgCO₂e/m³

C35/45 au CEM I pour les fûts et chevêtres pour 303 kgCO₂e/m³

C40/50 au CEM I pour les tabliers et longrines pour 328 kgCO₂e/m³

Les données d'entrée disponibles à ce stade du projet sont :

- 1500 m² d'OANC de type Viaduc, soit 155 mètres linéaires

La contribution aux émissions de gaz à effet de serre des matériaux de construction des ouvrages non courants est récapitulée dans le tableau ci-dessous :

Surface OANC	Tablier mixte - hourdis béton armé (m3)	Appuis sauf fondations ni culées béton armé (m3)	Fondations et culées béton armé (m3)	Béton (m3)	Armatures acier (T)	C.M. - acier de construction (T)	Frais généraux carbone
1 511 m ²	500 m3	660 m3	200 m3	1 360 m3	211 T	31 T	15%
Contribution élémentaire (T eq CO2)	164 tCO2	200 tCO2	31 tCO2	395 tCO2	359 tCO2	68 tCO2	123 tCO2

Contribution Matériaux de construction OANC (T eq CO2)	945 tCO2
---	-----------------

2.4. Chaussées : 7 800 tonnes équivalent CO₂

Les produits bitumineux issus du pétrole nécessitent de l'énergie pour obtenir la chaleur permettant leur élaboration et leur mise en œuvre, d'où les émissions de gaz à effet de serre qui leur sont attribuées. De fait, le niveau d'émissions par unité est bien plus faible que pour du béton de ciment. Leur importante contribution dans un projet autoroutier tient à la très grande quantité mise en œuvre.

Les valeurs de la Base Carbone® retenues pour le projet sont les suivantes :

Produit	KgCO ₂ e/tonne
Grave bitume classe 3	48
Béton bitumineux semi-grenu (BBSG)	55

Nous avons fait l'hypothèse d'une chaussée constituée de 20 cm de grave-bitume classe 3 sous 6 cm de Béton bitumineux semi-grenu pour une surface de 246 000 m², l'ensemble avec une masse volumique de 2,3 tonne/m³, et une centrale d'enrobés située à 50 km en moyenne du lieu de mise en œuvre.

Surface chaussée (m ²)	230 000 m ²	f.e. (kgCO ₂ e par tonne)	Source	Contribution GES (tCO ₂ e)
Volume GB (m ³)	46 00 m ³			
Volume BBSG (m ³)	13 800 m ³			
Masse GB (T)	105 800 tonnes	48	Base Carbone	5 100 tCO ₂ e
Masse BBSG (T)	31 740 tonnes	55	Base Carbone	1 700 tCO ₂ e
Transport (sur 50 km, 150 gCO ₂ e/ton.km compte tenu du retour à vide)	147 108 tonnes	7,5	Base Carbone	1 000 tCO ₂ e
				7 800 tCO₂e

Nota : il existe maintenant des enrobés dont le liant est d'origine végétale (résidus de papeterie), et pour lesquels le CO₂ stocké dans la chaussée est équivalent à celui libéré par les opérations d'enrobage compris dans la fourniture de granulats issues de fraisât de chaussée.

2.5. Assainissement : 1 750 tonnes équivalent CO₂

Lorsque les ouvrages d'assainissement font appel à du béton (armé ou non), les causes d'émission sont les mêmes que celles liées aux ouvrages d'art.

Nous avons supposé des cunettes bétonnées de chaque côté de la 2x2 voies, soit un linéaire de 20 km pour une section trapézoïdale de largeur en tête 2m, largeur en fond 0,5m, hauteur 0,3m, revêtue de 10cm de béton non armé. Ce béton est considéré comme moyennement carboné, nous lui avons affecté un facteur d'émission de 250 kg équivalent CO₂ / m³.

Pour les 10 petits ouvrages de rétablissement hydrauliques, nous avons considéré 10 buses de section circulaire 1m, d'épaisseur de paroi 10cm pour une longueur 50m.

Les OH 11 et OH 12, correspondant respectivement à des rétablissements faune/hydraulique et agricole/faune/hydraulique, nous avons considéré 2 dalots de section 3m * 4m ep 40cm et de longueur 40m, armés à 100 kg/m³.

Ce béton issu de préfabrication est considéré comme assez carboné, soit 320 kg CO₂e/m³. Comme pour les ouvrages d'art, le facteur d'émission pour les aciers d'armatures est pris en compte égal à 1700 kg équivalent CO₂ par tonne.

Enfin, les 10 bassins de rétention sont considérés selon l'hypothèse la plus défavorable comme revêtus de 20 cm de béton armé moyennement carboné (soit 350 kg CO₂e/m³ y compris les armatures), de surface unitaire 1000 m², avec des pentes progressives qui permettent de négliger les rebords dans le calcul de la surface bétonnée.

ASSAINISSEMENT	Quantité	Volume béton (m ³)	tCO ₂ eq/m ³	tCO ₂ eq
Cunettes béton	18 700 ml	3 960 m ³	251	990 tCO ₂ e
OH	12 U	272 m ³	404	110 tCO ₂ e
Bassins	10 U	1 870 m ³	350	650 tCO ₂ e
				1 750 tCO₂e

2.6. Equipements : 3 200 tonnes équivalent CO₂

Nous considérons ici les glissières de sécurité, les clôtures et la signalisation. Les principales causes d'émission sont l'emploi de béton et d'acier galvanisé. Ce dernier dispose d'un facteur d'émission proche du double de celui de l'acier de construction brut.

Nous prenons en compte 9,35 km de section comportant en section courante 2 glissières latérales simples, et une glissière centrale en béton type BBA ; ne connaissant pas à ce stade la nature (acier ou béton) des glissières simples, le facteur d'émission générique préconisé par le CEREMA sera appliqué, c'est-à-dire 115 kg équivalent CO₂ par mètre linéaire.

	Linéaire (km)	Facteur d'émission (kg CO ₂ e/m)	Contribution (T CO ₂ e)
Glissière simple section courante	18,7 km	115	2 000 tCO ₂ e
Glissière centrale béton	9,35 km	68	600 tCO ₂ e
			2 600 tCO₂e

Pour les clôtures, nous retenons l'hypothèse d'un linéaire de 18,7 km, avec une masse linéique de 5 kg par mètre pour un facteur d'émission d'acier galvanisé de 3,19 kg équivalent CO₂ par kg. Cette valeur est issue d'un rapport BEGES publié en 2015. Cela donne un total de **300 tonnes** équivalent CO₂.

Enfin, pour la signalisation, le retour d'expérience d'affaires étudiées précédemment avec leur chiffrage nous permet de retenir en première approche une contribution forfaitaire de **300 tonnes** équivalent CO₂ pour l'ensemble du projet.

3. Postes d'émission de la phase exploitation et entretien :

3.1. Trafic : un supplément de **10 000 tonnes équivalent CO₂ sur 50 ans.**

Les hypothèses du Bilan socio-économique supposent une mise en circulation de la 2x2 voies en 2028.

Pour les calculs, nous avons retenu la moyenne des évolutions de trafic (référence et projet) entre les scénarios AME et AMS, sur la base de l'étude de trafics réalisée par AtlanticTransports en 2023.

En conclusion des évaluations carbone, on observe une très légère augmentation de trafic global, de l'ordre de 0,7% entre la situation de projet et la situation de référence. A 80%, la hausse des émissions de CO₂ envisagée est associée à l'augmentation de la vitesse de circulation des voitures sur la 2X2 voies. 7% est induit par l'augmentation.

En 2028, ce sont 13 500 veh/jour qui parcourront 9,35 km à 110 km/h au lieu de 70 km/h, augmentant leur consommation moyenne de 5,5 à 6,1 l/100 km.

Cela représentera 600 tCO₂ supplémentaire en 2028.

Cette hausse d'émissions sera réduite à 360 tCO₂ annuelles en 2038 avec l'électrification progressive du parc de véhicule léger. Puis à 0 tCO₂ en 2050.

En volume cumulé, le supplément de CO₂ totalise 10 000 tCO_{2e} à l'horizon 2050, date à laquelle, l'électrification complète du parc roulant rend peu significatif la différence entre situation de projet et de référence.

Ce volume est à mettre en perspective avec les émissions des travaux qui généreront de l'ordre de 30 000 tCO_{2e}.

3.2. Trafic : hypothèses techniques retenues – détail du calcul

L'évaluation CO₂ de ces éléments de trafic suit la préconisation du CEREMEA, et retient le scénario correspondant de la SNBC, celui Avec Mesures Supplémentaires, qui vise en particulier à une électrification totale du parc automobile à l'horizon 2050.

Pour évaluer ces impacts CO₂, la totalité de l'évolution du trafic sur chaque année est conjuguée aux émissions moyennes du parc en fonction de l'année concernée.

La consommation des véhicules en 2019 est établie à partir des équations **COPERT 5** (5,5 lt/100 km à 70 km/h sur le réseau existant pour les VL Diesel / 6,1 lt/100 km à 110 km/h sur la 2x2 voies pour les mêmes VL).

En 2050, la circulation automobile est totalement décarbonée. Nous avons adopté une régression linéaire du facteur d'émissions de la consommation des véhicules entre 2019 et 2050, aboutissant à zéro émission nette en 2050.

Cela permet, pour chaque année, d'obtenir la différence entre les émissions globales de la circulation en présence de l'aménagement et les émissions globales de la circulation en l'absence de celui-ci.

Pour être plus réaliste, nous avons ajouté les émissions amont liées à l'élaboration du carburant et à la fabrication du véhicule. Celles liées à l'élaboration du carburant sont actuellement d'une valeur égale à

25% de celles liées à la combustion. Bien que l'extraction de pétrole, exploitant une part croissante de ressources non conventionnelles, va induire une tendance à la hausse de ces émissions amont, nous avons appliqué de façon constante ce facteur sur la période 2035 – 2050. Celles liées à la fabrication du véhicule sont documentées dans la Base carbone de l'ADEME et s'élèvent à 40 g CO₂e / VL.km pour les véhicules légers et à 100 g CO₂e / PL.km pour les poids lourds. Les fabrications des véhicules électriques émettent actuellement de l'ordre du double de celles d'un véhicule thermique mais sont amenées à baisser. Nous avons pris l'hypothèse d'une émission constante sur la période 2035 – 2050 où les véhicules thermiques sont progressivement remplacés par des véhicules électriques, puis une diminution linéaire divisant par deux celles-ci entre 2050 et 2070 pour être ensuite constantes jusqu'en 2140.

On trouve dans le tableau ci-dessous l'évolution du trafic journalier moyen par année induite par la présence de l'aménagement, pour les véhicules légers et pour les poids lourds, croisée avec l'hypothèse du facteur d'émission moyen annuel pour les véhicules légers et pour les poids lourds. L'évolution des émissions annuelles induite par la présence de l'aménagement se calcule sur une base de 365 jours, en additionnant les émissions des véhicules légers et des poids lourds, chacun obtenus en multipliant l'évolution du trafic par le facteur d'émission.

Pour les émissions des poids lourds, la distinction entre les émissions sur route et sur une 2x2 voies peut être négligée (différence de vitesse faible contrebalancée par une meilleure régularité de rythme sur autoroute). Ce n'est pas le cas des véhicules légers qui circulaient en consommant 5,5 lt/100 km sur le réseau existant à 80 km/h et consommeront 6,1 lt/100 km sur la 2 x 2 voies à 110 km/h (valeur COPERT pour 2019).

Année	nb de VL en plus (veh.km/jour)	nb de VL transféré sur autoroute (veh.km/jour)	nb de PL en plus (veh.km/jour)	fe VL sur la 2x2 voies (110 km/h)	fe VL sur route (70 km/h)	fe PL tout réseau	tCO ₂ e/an augmentation du trafic VL	tCO ₂ e/an rajoutée du fait de voitures plus rapides	tCO ₂ e/an sur l'augmentation trafic PL	écart Projet sur référence (tCO ₂ eq/an)	Empreinte Carbone du trafic circulant sur l'autoroute (tCO ₂ eq/an)
2028	934	119 537	115	174	160	718	59	596	30	686	15 593
2029	950	120 330	120	168	155	691	58	574	30	663	15 156
2030	970	121 130	120	163	150	664	58	552	29	638	14 711
2031	970	121 920	130	157	145	637	55	529	30	615	14 257
2032	990	122 720	130	151	140	611	55	506	29	589	13 794
2033	1000	123 510	130	145	134	584	53	482	28	563	13 323
2034	1020	124 310	140	139	129	557	52	458	28	539	12 843
2035	1030	125 100	130	133	124	530	50	434	25	509	12 352
2036	1050	125 900	130	128	119	503	49	409	24	482	11 855
2037	1060	126 690	140	122	113	476	47	385	24	456	11 348
2038	1075	127 485	145	116	108	449	45	359	24	429	10 834
2039	1130	128 340	160	110	103	422	45	334	25	404	10 317
2040	1180	129 190	170	104	98	396	45	308	25	377	9 790
2041	1230	130 040	180	98	92	369	44	282	24	350	9 253
2042	1280	130 890	210	93	87	342	43	255	26	324	8 708
2043	1320	131 740	220	87	82	315	42	228	25	295	8 152
2044	1370	132 590	240	81	77	288	40	201	25	267	7 588
2045	1420	133 440	250	75	71	261	39	173	24	236	7 014
2046	1470	134 290	260	69	66	234	37	145	22	205	6 430
2047	1520	135 140	280	63	61	207	35	117	21	173	5 838
2048	1573	135 993	292	58	56	181	33	88	19	140	5 236
2049	1610	136 820	300	52	50	154	30	59	17	106	4 623
2050	1640	137 640	310	46	45	127	27	30	14	72	4 002
2051	1670	138 460	320	40	40	100	24	0	12	36	3 371
2052	1700	139 280	330	38	38	95	24	0	11	35	3 223
2053	1740	140 110	340	37	37	93	23	0	11	35	3 159
2054	1760	140 930	340	36	36	90	23	0	11	34	3 094
2055	1790	141 750	350	35	35	88	23	0	11	34	3 027
2056	1830	142 580	370	34	34	85	23	0	11	34	2 960
2057	1860	143 400	380	33	33	83	22	0	11	34	2 891
2058	1890	144 220	380	32	32	80	22	0	11	33	2 822
2059	1920	145 040	390	31	31	78	22	0	11	33	2 751
2060	1960	145 870	400	30	30	75	21	0	11	32	2 679

Bilan carbone du projet de mise à 2x2 voies de la RN141 – Section Chasseneuil à Roumazières

2061	1960	145 870	400	29	29	73	21	0	11	31	2 589
2062	1960	145 870	400	28	28	70	20	0	10	30	2 500
2063	1960	145 870	400	27	27	68	19	0	10	29	2 411
2064	1960	145 870	400	26	26	65	19	0	9	28	2 321
2065	1960	145 870	400	25	25	63	18	0	9	27	2 232
2066	1960	145 870	400	24	24	60	17	0	9	26	2 143
2067	1960	145 870	400	23	23	58	16	0	8	25	2 054
2068	1960	145 870	400	22	22	55	16	0	8	24	1 964
2069	1960	145 870	400	21	21	53	15	0	8	23	1 875
2070	1960	145 870	400	20	20	50	14	0	7	22	1 786
2071	1960	145 870	400	20	20	50	14	0	7	22	1 786
2072	1960	145 870	400	20	20	50	14	0	7	22	1 786
2073	1960	145 870	400	20	20	50	14	0	7	22	1 786
2074	1960	145 870	400	20	20	50	14	0	7	22	1 786
2075	1960	145 870	400	20	20	50	14	0	7	22	1 786
2076	1960	145 870	400	20	20	50	14	0	7	22	1 786
2077	1960	145 870	400	20	20	50	14	0	7	22	1 786
2078	1960	145 870	400	20	20	50	14	0	7	22	1 786
									Cumul 2028-2050	9 118	

Il ressort de ce tableau que globalement ce projet engendrera un surplus « trafic » de l'ordre de 10 000 tCO₂e sur les 50 premières années de son exploitation.

3.3. Entretien et exploitation : 5 100 tonnes équivalent CO₂ sur 50 ans

Pour l'entretien, les hypothèses se limitent à un ratio sur les ouvrages issus d'un guide du CEREMA et à un scénario de réfection périodique de la couche de roulement, en prenant une largeur totale de la chaussée sur 6 cm d'épaisseur (soit 13 801 m³) tous les 10 ans.

Pour le fret, le facteur d'émission du fret est pris égal à 0,08 kg CO₂e/T.km sur la première opération de réfection puis nul ensuite (en cohérence avec l'évolution des facteurs d'émission du trafic), les opérations de rabotage et d'application des enrobés sont négligées à ce niveau d'approche.

Le facteur d'émission des enrobés est assimilé égal à celui de la Base Carbone pour les BBSG (55 kg CO₂e/T pour une masse volumique de 2,3T/m³, cf. onglet chaussées) sur la première réfection, puis à la moitié de celui-ci sur la deuxième opération et enfin stabilisé au quart de la valeur initiale sur les 8 opérations suivantes. Cela simule une décarbonation du secteur.

Enfin, la distance entre le chantier et les sites de production ou de dépotage est égale à 50km sur la première opération, passe à 25 km ensuite, ce qui permet de simuler l'introduction du recyclage en place des chaussées (même si les émissions du fret passent à zéro dès la deuxième opération, ce qui annule l'effet d'une variation de distance, on garde dans les calculs ces variations pour faciliter d'éventuelles reprises de ce calcul lorsque des paramètres plus précis seront donnés en phase ultérieure de développement).

Le résultat des calculs est présenté dans le tableau ci-dessous :

Numéro d'étape d'entretien	Contribution des enrobés (T CO ₂ e)	Contribution du fret (T CO ₂ e)	Total étape d'entretien (T CO ₂ e)
Entretien 1 – 2045	1 700	100	1 800
Entretien 2 – 2055	900	0	900
Entretien 3 – 2065	400	0	400
Entretien 4 – 2075	400	0	400

Entretien 5	400	0	400
Entretien 6	400	0	400
Entretien 7	400	0	400
Entretien 8	400	0	400
Entretien 9	400	0	400
Entretien 10	400	0	400

Cela nous donne pour les 50 premières années d'exploitation, un total de **3 500 tonnes équivalent CO₂**.

Nota : En situation de référence, sans la présence de la 2x2 voies, l'entretien courant pour 10 km de section RN141 bidirectionnelle consiste à mettre en œuvre 18 000 t d'enrobé tous les 12 ans, soit encore 2000 tCO₂e sur les 50 prochaines années, en retenant le même cadre d'hypothèse que celui décrit pour la 2x2 voies.

Pour ce qui est de l'entretien des ouvrages, le CEREMA retient un facteur d'émission de 210 kgCO₂e/m² pour son entretien et sa fin de vie. Pour 4 600 m² d'Ouvrage d'art, cela représente **540 tCO₂e**.

Pour ce qui est de l'exploitation, nous avons supposé une flotte de véhicules composée de 5 véhicules individuels (parcourant chacun 30 000 km annuels), 2 fourgons (parcourant chacun 50 000 km annuels) et 1 poids lourds (parcourant chacun 50 000 km annuels). Nous avons appliqué les émissions de GES par kilomètres qui étaient déjà prises en compte dans l'étude des émissions liées au trafic routier (valeur mixte route et autoroute aussi bien pour les VL que pour les PL), en prenant pour les fourgons l'hypothèse d'émissions majorées de 50% par rapport aux véhicules individuels.

Basés sur ces hypothèses, les calculs d'émission donnent pour la contribution du poste « exploitation » une évaluation à hauteur de **1 050 tonnes équivalent CO₂**.

3.4. Autonomie énergétique du projet :

Sur le parcours de 9,35 km, il sera consommé en 2028 l'équivalent de 5 700 m³ de carburant par an (PL et VL inclus). Cela représente 57 GWh thermiques, ou encore 23 GWh d'électricité pour quand l'ensemble du parc sera électrifié.

Une aire de repos intégrant plus de 1500 m² de surface de stationnement est prévue à proximité de l'échangeur de Roumazières-Loubert. Au vu de la récente loi du 10 mars 2023 relative à l'accélération de la production d'énergies renouvelables, et considérant que la réalisation de l'aire de repos interviendra en 2029 (cf. Planning prévisionnel de la DREAL Nouvelle-Aquitaine), des fourreaux anticipant l'installation d'ombrières photovoltaïques (et de bornes électriques pour les véhicules) seront installés sur l'aire. L'aménagement des ombrières photovoltaïques n'étant pas prévu dans le financement global de l'opération, un Appel à Manifestation d'Intérêt (AMI, projet tiers) permettra leur mise en œuvre dans un second temps.

4. Pistes de réduction

Préalable : En termes d'émissions dans le secteur des travaux public en général, 80% des volumes sont directement figés par les choix d'orientation de la maîtrise d'ouvrage : un ouvrage neuf ou une mise à niveau d'un ouvrage existant, etc...

A leur tour, les maîtres d'œuvres peuvent influencer sur des procédés généraux de construction et quelques grandes orientations géométrique. On estime qu'ils tiennent alors la main sur 15 % des émissions induites par le projet.

Les entreprises par le choix de quelques fournitures, toutefois déjà très contraintes par un cadre technique rigoureux, n'auront-elles la main que sur moins de 5% des émissions du projet.

Plus la dimension carbone est anticipée à l'amont des décisions, plus elle est efficace.

Dans le cadre du présent projet, de nombreuses options sont déjà figées et de fait, les marges de manœuvre seront cantonnées aux variantes des entreprises.

4.1. Ouvrir le projet à des variantes répondant aux mêmes objectifs lors des phases de consultation des entreprises.

Les ouvertures à variante sont fréquentes (cf. Règlement de la consultation du Terrassement Assainissement Chaussée (TAC) de Roumazières-Exideuil, la section adjacente), les candidats aux appels d'offres ayant ainsi la possibilité de présenter une offre variante avec toutefois des exigences minimales à respecter. Ce dispositif d'ouverture à variantes permet d'aboutir à des solutions optimisées moins impactantes pour l'environnement (bilan GES réduit), donc moins chères, pour un prix de la tonne de CO2 très compétitif.

Les pistes d'optimisation peuvent être proposées par les entreprises dans le cadre des appels d'offre, sachant que le MOA y porte une attention particulière en intégrant le critère environnement dans la notation des offres. Dans le cas de l'appel d'offre pour le TAC de Roumazières-Exideuil, les performances en matière d'environnement représentaient 20% de la note globale et une AMO spécialisée sur les différentes thématiques environnementales (également coordinateur environnemental de l'opération) a été sollicitée.

Dans le cas d'un projet routier tel que la mise à 2x2 voies de la RN141, le dispositif d'ouverture à variante pourrait permettre de :

- séquencer les terrassement pour réduire l'utilisation de la chaux
- mettre en œuvre des enrobés avec un taux élevé d'agrégats, notamment sur les voies avec trafic faible
- optimiser le complexe couche de forme / structure de chaussées pour réduire les épaisseurs

4.2. Changement d'affectation des sols

Réduire au maximum les zones imperméabilisées : drainer les eaux sur des aménagements végétalisés et non bétonnés à chaque fois que possible, surtout les zones en amont de la route, là où les eaux ne sont pas susceptibles d'être souillées par les rejets des véhicules.

Chaque mètre carré non artificialisé d'une prairie évite le rejet de 29 kg d'équivalent CO₂ dans l'atmosphère.

De même, des terres agricoles (travaillées annuellement, présentant des bas taux de matière organique, et donc un faible contenu Carbone) qui se retrouvent à la suite des travaux dans l'emprise de l'autoroute doivent retourner au maximum à l'état de prairies permanentes pour optimiser leur capacité de séquestrer du CO₂ (-0,18 kg CO₂e /m².an).

Défricher au minimum les zones boisées sera le meilleur levier d'action lié au changement d'affectation des sols. Pour chaque mètre carré de zone boisée détruite puis revégétalisée, 29 kgCO₂e seront libérés dans l'atmosphère.

La prise de mesure de taux de matière organique dans les sols avant décapage, et leur suivi dans le temps (2 ans, 5 ans, 10 ans) après remise en place à leur destination finale permettra de mieux cerner la qualité des mesures de préservations mise en œuvre et la dynamique du stockage de CO₂ dans les sols après travaux.

4.3. Terrassements

On notera que les traitements ont une contribution très significative dans l'empreinte carbone d'un projet de terrassement. La chaux est très employée pour les matériaux sensibles à l'eau mis en place en présence d'eau, comme par exemple des limons ou d'autres matériaux argileux. Toutefois, les plannings serrés, s'ils ont un côté « challenge » pour les équipes travaux, peuvent être regardés différemment :

Certes, un raccourcissement raisonné de la durée du chantier a un impact favorable sur le coût global des travaux, toutefois il est possible de considérer une organisation à moindre coût sur des gains à facteurs multiples qui se décorrèlent relativement de la durée du chantier. Pour ce qui est des dates, on peut prendre un peu de recul et mettre en balance l'enjeu de gagner un an sur une exécution de travaux quand certaines décisions à mettre un projet en réalisation s'étalent sur des décennies : où peut-on gagner du temps ? cette remarque vient du fait que l'emploi de matériaux sensibles en périodes humides est gourmande en chaux, alors que les mêmes matériaux mis en œuvre dans des conditions sèches en nécessitent moins, voire peuvent s'en passer, à la mise en œuvre. Le regard porté sur les plannings nécessite une revue de fond pour intégrer la contrainte carbone dont ils étaient longtemps affranchis, tout en respectant les autres contraintes de biodiversité qui imposent en particulier des périodes favorables aux décapages par les arrêtés d'autorisation environnementale.

Dans notre cas, un planning de chantier permettant de profiter des conditions météorologiques favorables permettrait d'éviter le traitement des matériaux de remblais étant prélevés sur le chantier. Dans le cas où 30% de matériaux de remblais supplémentaires (120 000 m³) devaient être traités à 3% de chaux, le supplément CO₂ serait de l'ordre de 7 000 tCO₂ pour la fourniture de la chaux et 20 tCO₂ pour en assurer l'incorporation.

Les liants routiers permettent d'augmenter les performances mécaniques des matériaux mis en structure de chaussée (sous-couches notamment). Des études plus fines d'optimisation intégrant l'empreinte carbone dans le choix du traitement des matériaux peuvent être menées lors des reconnaissances de terre, de façon à réduire l'emploi de ces liants pour les mêmes performances garanties.

4.4. Ouvrages d'art

Le premier levier est la réduction de la surface au sol des ouvrages, ce qui passe notamment par le choix de tracé. La remarque sur la vitesse de conception de certains tronçons est valable également dans ce cas, car un tracé moins exigeant se contente de moins de surface d'ouvrages supportant l'infrastructure, voire exceptionnellement de passer d'un ouvrage non courant à un passage inférieur de type ouvrage courant. On peut aussi se pencher sur la question des rétablissements de communication, là où certaines continuités de voies peuvent être supprimées (un simple passage faune sera moins contributeur d'émissions de GES qu'un ouvrage routier), là où d'autres peuvent être regroupées.

Sur les ouvrages eux-mêmes, se pose ensuite le choix de la conception de matière. Des culées, par exemple, peuvent être des ouvrages de génie-civil avec des fondations profondes ou de simples sommiers posés sur des remblais. Des choix de conception valables intégrant l'empreinte carbone dans le schéma de décision peuvent, pour un même tracé en plan, jouer un rôle utile. Les matériaux eux-mêmes sont à regarder : tablier mixte ou entièrement en béton ? quelles conséquences sur le tablier lui-même mais aussi sur ses appuis ? la prise en compte de l'empreinte carbone dans les critères de choix peut amener à des évolutions de conception qui, sans changer les aspects fonctionnels de l'ouvrage, auront un impact bénéfique sur le plan de la comptabilité carbone. La géométrie également, peut favoriser un moindre travail de la matière que d'autres. L'équilibre est à trouver avec le parti architectural et les choix esthétiques. Par exemple, de grands porte-à-faux sont parfois audacieux et élégants, mais amènent un accroissement des contraintes pour une même descente de charge, ce qui nécessite des bétons de plus grande résistance, parfois en plus grande quantité, et davantage d'armatures et se répercute directement sur l'empreinte carbone de l'ouvrage.

Le choix des matériaux, enfin, joue également son rôle. Le choix sans surdimensionnement inutile des classes de résistances mécaniques des bétons et de leurs classes d'exposition environnementale évite les surdosages en liant tout en remplissant les exigences de performance et de durabilité. Pour un même dosage de liant donné, le choix des ciments a son rôle à jouer. Le principal émetteur de gaz à effet de serre est la réalisation du clinker (de l'ordre de 800 kg eq CO₂ par tonne, pour 40% à cause de la chaleur nécessaire à sa production et pour 60% lors de la calcination du calcaire, qui en libérant du CO₂ devient de la chaux vive au début du processus de transformation de cru en clinker). Les ciments les plus dosés en clinker ont ceci de particulier qu'à même résistance mécanique de long terme, ils offrent de meilleures montées en résistance à jeune âge, favorisant les performances du planning (une levée de pile par jour par exemple). Des ciments moins dosés en clinker, à moindre empreinte carbone donc, peuvent ralentir les cadences de production pour certaines parties d'ouvrage (décintrages de tabliers par exemple). Le choix est à arbitrer entre les choix plannings (et parfois l'optimisation des coûts) et une diminution pouvant aller sans rupture technologique majeure jusqu'à 20% ou 30% de l'empreinte carbone, toutes autres caractéristiques de l'ouvrage fini étant fixées par ailleurs.

4.5. Chaussées

L'abaissement de la température des mélanges bitumineux permet – à performance égale – de réduire leur empreinte carbone. On notera également la possibilité de favoriser les sous-couches de la structure de chaussée pour diminuer le besoin en épaisseur d'enrobés. Cette optimisation est généralement proposée dans le cadre du dispositif d'ouverture à variantes lors des appels d'offres.

Enfin, la minéralisation du terre-plein central pourrait être remise en cause pour favoriser au maximum sa végétalisation.

4.6. Assainissements

Le premier levier, comme pour les ouvrages, consiste à réduire les quantités de béton.

Également, privilégier les bassins filtrants ou étanché par géomembrane sont des alternatives « bas carbone » à étudier au cas par cas. Dans le cadre du projet routier RN141 Chasseneuil-Roumazières, les bassins seront effectivement étanchés par géomembrane.

En première approche, on peut retenir qu'une tonne de CO₂ est évitée à chaque fois que trois mètres cubes de béton ne sont pas mis en œuvre.

En action complémentaire, on peut travailler à la réduction de l'intensité carbone de ces bétons, en diminuant leur teneur spécifique en clinker.

4.7. Equipements

Au stade actuel d'avancement du projet, ces solutions ne pourront être mises en œuvre que dans le cadre de variantes proposées par les entreprises.

Favoriser les équipements les plus légers sur le plan de l'empreinte carbone sans surdimensionner inutilement le niveau de performance (protection ou légèreté ou sécurité motocycle, qui ne partira pas violemment à l'intérieur d'une courbe) selon le principe du « qui peut le plus peut le moins » si cela n'apporte rien. Ainsi, une glissière métallique légère GS4 (1 poteau tous les 4 mètres ; niveau de protection N2-W6) sans système de protection motocycle a pour facteur d'émission 75 kg équivalent CO₂ par mètre linéaire ; pour une glissière métallique GS2 (1 poteau tous les 2m ; niveau de protection N2-W514) le facteur d'émission monte à 95 kg équivalent CO₂ par mètre linéaire tandis que le système de protection motocycle (utile notamment à l'extérieur des courbes) ajoute 55 kg eq CO₂ par mètre linéaire. Ces dispositifs ne retiennent que les véhicules légers. A titre de comparaison, une glissière lourde en béton adhérent (GBA) permet de retenir les poids lourds dans une certaine limite (niveau de protection H2) pour seulement 115 kg CO₂e par mètre linéaire. C'est encore plus marqué au niveau d'une protection centrale, où la protection lourde (DBA) a un facteur d'émission moindre que la protection légère en métal (DE2) : 130 kg eq CO₂/m contre 145 kg eq CO₂/m.

On notera également que la possibilité s'ouvre à l'introduction d'une partie de métal recyclé dans la composition des glissières métalliques, ce qui allège de 7% leur empreinte carbone par tranche de 10% de composition issue de recyclage des ferrailles, bien que la galvanisation – nécessaire pour la protection anticorrosion dans les conditions de bord de route – alourdisse significativement cette empreinte.

L'ensemble des valeurs communiquées ci-dessus sont issues des recommandations pour l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre des projets routiers du CEREMA

5. Conclusion

Le bilan carbone du projet de mise à deux voies de la RN 141 entre Chasseneuil et Roumazières engendre les évolutions d'émissions de CO₂ suivantes :

En phase construction, 32 000 tCO₂e seront émises, notamment par le changement d'affectation des sols, la construction de la chaussée et le terrassement des remblais. La phase de construction émet ainsi un volume non négligeable de CO₂.

En phase d'exploitation, le calcul des émissions de trafic fait apparaître les évolutions suivantes à la mise en service :

Globalement une augmentation du trafic, sur toute la durée pour les véhicules légers comme les véhicules lourds.

Le surplus d'émissions associé à ce trafic, en cumulé sur 50 ans est de l'ordre de 10 000 tCO₂e.

L'entretien de l'infrastructure engendrera en moyenne **des émissions de 100 tCO₂e/an**, principalement émises à l'occasion des opérations décennales de réfections de chaussées.

