

Note sur le calcul du bilan carbone pour les lignes nouvelles du GPSO

La présente note actualise les calculs antérieurs sur le bilan carbone en fonction du calendrier retenu comme objectif dans la décision ministérielle du 23 octobre 2013 et le dossier présenté à l'enquête d'utilité publique en 2014 : mise en service en 2024 de la ligne nouvelle Bordeaux - Toulouse, en même temps que les aménagements ferroviaires au Sud de Bordeaux (AFSB) et les aménagements ferroviaires au Nord de Toulouse (AFNT), puis mise en service de la section entre Sud Gironde et Dax en 2027 (ces opérations constituant la phase 1 du GPSO), et de Dax-Espagne en 2032 (phase 2).

Ce document présente les effets CO₂ pour les lignes nouvelles présentées en enquête publique. Les calculs sont ainsi basés sur le projet technique (au stade d'avant-projet sommaire), les données de fréquentation et les bilans socioéconomiques inscrits au dossier.

Préalable sur les principales hypothèses externes au programme du GPSO

I. Le contenu CO₂ de l'électricité

L'électricité consommée dans les trains est en partie produite par des centrales thermiques fonctionnant aux énergies fossiles. Les trois approches détaillées ci-après semblent éligibles. Elles ont toutes les trois été utilisées pour évaluer le contenu CO₂ de prestations de transport ferroviaire :

- ✓ considérer l'électricité effectivement achetée par la SNCF, principal opérateur du réseau actuel (qui paraît l'hypothèse retenue par la SNCF pour son éco-comparateur) ;
- ✓ considérer de l'électricité française (produite en France, à distinguer de la production du groupe EDF qui n'est pas le seul producteur français, et qui produit également à l'étranger) ;
- ✓ considérer de l'électricité européenne : le mix électrique issu de la production de l'UE27.

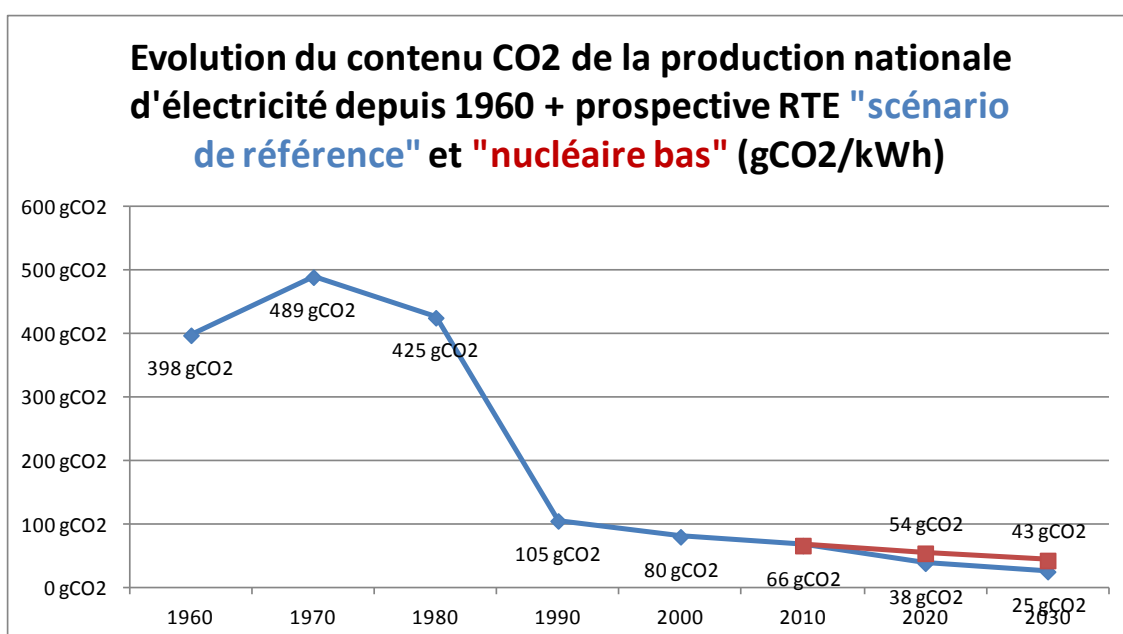
A. Le contenu CO₂ de l'électricité consommée par la SNCF

Entre 2007 et 2009, l'électricité achetée par la SNCF pèse entre 200 et 250 gCO₂/kWh (Source 2007 : <http://www.sncf.com/rapportannuel2007/sncf.htm> et suivant). Il est cependant délicat d'établir une projection dans l'avenir : quelle part des trains sera opérée par la SNCF, quelle électricité achèteront les opérateurs (la SNCF et les autres) dans les décennies à venir ? L'approche « contenu CO₂ de l'opérateur » semble appropriée pour un étiquetage CO₂ des prestations de transports au jour le jour lorsque cela permet d'être un facteur de choix entre plusieurs opérateurs ferroviaires pour un acte d'achat ponctuel. Elle ne permet pas de faire d'analyse prospective à long terme.

En novembre 2012, les facteurs d'émissions qui en découlent (éco comparateur SNCF) sont : 11,5 gCO₂/voy.km en TGV, 18,5 gCO₂/voy.km en Corail et train de nuit, 41,8 gCO₂ en TER sans distinguer les trains électriques des trains diesels.

B. Le contenu CO₂ de l'électricité produite en France

Cette approche permet d'intégrer le choix du nucléaire qui confère à la France depuis les années 1980 une position plus favorable par rapport au reste de l'Europe en matière de décarbonisation de notre économie. Le tableau suivant récapitule l'évolution du contenu CO₂ de l'électricité produite en France depuis 1960. Il intègre également deux scénarios de long terme établis par RTE en 2011. Le scénario « nucléaire bas » se distingue du scénario de référence en rajoutant les options suivantes : « EnR¹ haut », « MDE² renforcée », 25 GW nucléaires arrêtés.



C. Le contenu CO₂ de l'électricité produite en Europe – EU 27

Cette approche permet d'intégrer le contexte européen du marché de l'énergie et également de la politique européenne de quotas de CO₂ sur les plus importantes installations industrielles.

En particulier, avec le système de quotas mis en place, l'ouverture d'une centrale à charbon en Europe pénalise de la même manière le marché du CO₂ quel que soit le pays d'implantation de la centrale.

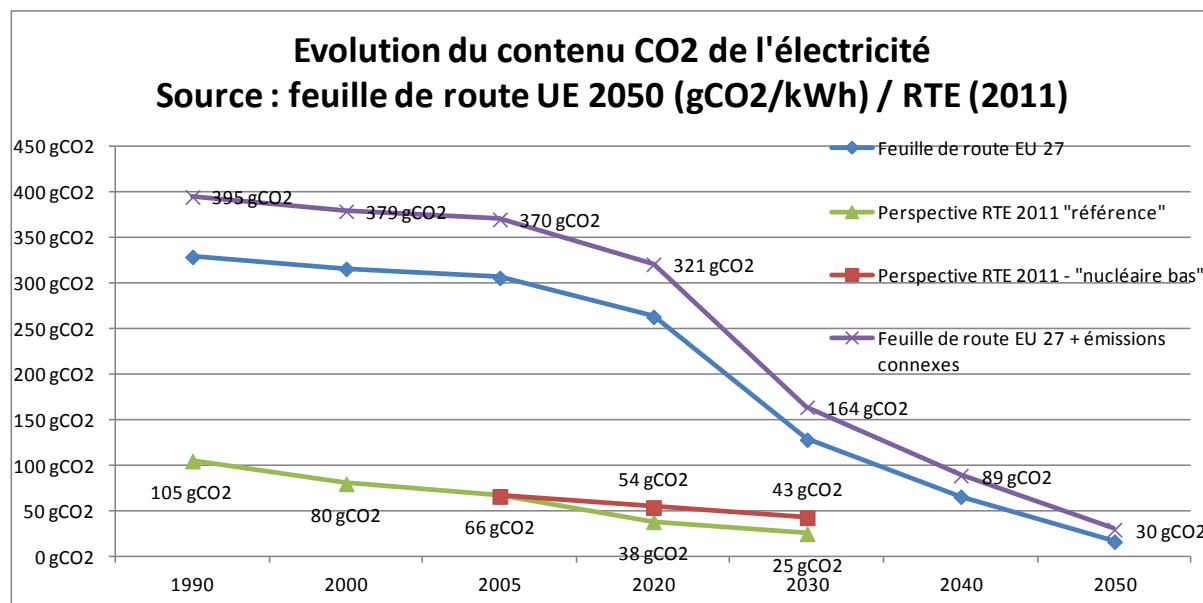
Le marché de l'électricité est ouvert à l'échelle européenne. L'Europe est soumise à la contrainte du facteur 4 :

¹ EnR = Energie Renouvelable

² MDE = Maitrise de la Demande en électricité

- ✓ au niveau européen, PricewaterhouseCoopers³ a établi un suivi des 20 principaux producteurs. La production globale de ces producteurs, pour ce qui concerne leurs sites de production européens représente 68% de l'électricité produite en Europe EU27. Depuis 2001, le contenu CO₂ moyen est proche de 370 gCO₂/kWh et il a été ramené à 350 gCO₂/kWh en 2008 et à 337 gCO₂/kWh en 2010 ;
- ✓ la méthode Bilan Carbone propose un facteur d'émissions moyen pour l'EU27 de 306 gCO₂/kWh issu des bases de données de l'AIE pour l'année 2006 ;
- ✓ la feuille de route⁴ pour l'UE en 2050 indique que le secteur de l'énergie (principalement la production électrique) en 2005 avait baissé ses émissions de 7% par rapport à 1990. La baisse attendue pour 2030 serait comprise entre 54% et 68%, et de 93% à 99% en 2050 ;
- ✓ dans tous les cas de figures ci-dessus, il convient de rajouter les émissions amont (extraction, raffinage, transport des combustibles – de l'ordre de 10% pour les énergies fossiles), et d'infrastructure (fabrication du parc de production, transport d'électricité, perte en ligne sur le réseau – de l'ordre de 10% de la production) ;

Au vu de ces éléments, les valeurs prospectives retenues pour le contenu CO₂ de l'électricité européenne injectée sur le pantographe sont les suivantes :



D. Le contenu CO₂ de l'électricité à prendre en compte

Dans le cadre du GPSO, a été testée la possibilité d'utiliser des délaissés de surface pour y installer des fermes solaires photovoltaïques, qui pourraient couvrir 50% des besoins générés par le projet, soit environ 125 GWh par an d'électricité (à titre d'hypothèse, s'agissant d'installations hors programme du GPSO tel que présenté à l'enquête publique). Selon le guide des facteurs d'émissions de l'ADEME, l'analyse du cycle de vie des panneaux solaires suggère une valeur de 55 gCO₂/kWh

³ http://www.pwc.fr/fr/pwc_pdf/pwc_carbon_factor_fr_2005.pdf

⁴ http://ec.europa.eu/clima/policies/roadmap/perspective/index_en.htm

pour la production d'un kWh photovoltaïque en France. Cette valeur est largement constituée de CO₂ issue d'une consommation d'électricité. Elle devrait donc varier selon le pays de production des panneaux, pouvant probablement être très significativement réduite si les lingots de silicium étaient par exemple produits en France. L'installation devant probablement être renouvelée au bout d'une vingtaine d'années environ, on accordera à ce facteur d'émission la même progression que celle de l'électricité européenne.

Au final est retenue l'hypothèse d'un marché européen de l'électricité pour les 50% de la fourniture restante.

Tous les producteurs d'électricité à base d'énergie fossile en Europe sont soumis au système de quotas de CO₂ assorti d'objectifs de réduction en phase avec les engagements européens en matière de lutte contre le changement climatique. Les opérateurs ferroviaires achètent de l'électricité sur ce marché. Le contenu carbone de cette électricité est de l'ordre de 350 teCO₂/GWh en 2010. On estime qu'il sera de 245 TeCO₂/GWh en 2025 et qu'il évoluera vers 90 teCO₂/GWh en 2040 et 30 teCO₂/GWh en 2050 (toutes émissions incluses, extraction, transport, perte en ligne,...).

On retiendra les valeurs correspondantes suivantes pour les dates pivots des études socio-économiques du programme GPSO :

Evolution du contenu CO ₂ de l'électricité européenne	
En 2010	350 gCO ₂ /kWh
En 2025	245 gCO ₂ /kWh
En 2030	164 gCO ₂ /kWh
En 2040	90 gCO ₂ /kWh
En 2055	30 gCO ₂ /kWh

Evolution du contenu CO ₂ de l'électricité prise en compte pour GPSO (50% photovoltaïque – 50% EU27)	
En 2010	
En 2025	150 gCO ₂ /kWh
En 2030	110 gCO ₂ /kWh
En 2040	65 gCO ₂ /kWh
En 2055	30 gCO ₂ /kWh

II. ***Le contenu CO₂ du veh.km en voiture***

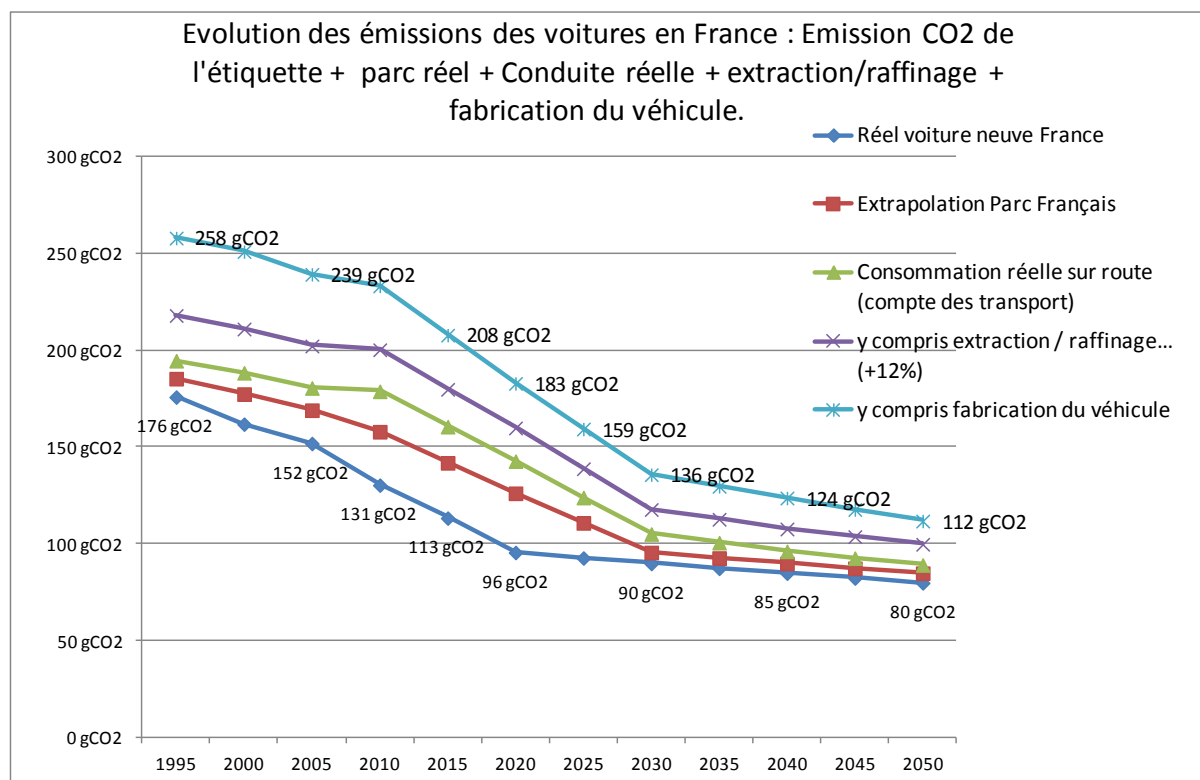
Compte tenu de l'âge moyen du parc automobile (environ 7 ans), la traduction de la réduction des émissions de CO₂ des voitures neuves se traduit avec un effet retard du même ordre dans les émissions de la circulation automobile.

En 2009, l'Union européenne a imposé un certain nombre de contraintes et d'objectifs aux constructeurs automobiles au travers du règlement n°443/2009⁵. Il prévoit de ramener la moyenne des émissions de CO₂ de 100% des voitures neuves à 120 gCO₂ en 2015 et introduit un objectif de long terme à 95 g CO₂ en 2020.

A plus long terme, on ne dispose pas d'analyse « officielle ». Passer l'ensemble du parc automobile au dessous des 3 litres aux 100 km (de l'ordre de 80 gCO₂ par veh.km) semble à la portée des technologies en cours de développement (hybride plugable, downsizing, ...).

La voiture électrique dispose d'un relais à prendre, mais viendra ensuite la nécessité de produire de l'électricité proprement. Aujourd'hui, une (petite) voiture consommant 25 kWh/100 km d'électricité européenne génère déjà de l'ordre de 80 g de CO₂ par km.

Le tableau ci-dessous reprend ces hypothèses et rajoute aux seules émissions des voitures, celles liées aux conditions de conduites réelles sur route (+15%), à l'extraction et au raffinage du carburant (+10%), et à la fabrication du véhicule (amortissement sur la durée de vie, valeurs dégressives allant de 25 gCO₂/veh.km en 2010 à 12 gCO₂/veh.km en 2050 pour intégrer les progrès dans la fabrication des voitures).



⁵ <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0001:0015:fr:PDF>

On retiendra les valeurs correspondantes suivantes pour les dates pivots des études socio-économiques du programme GPSO :

Evolution attendue des émissions des voitures neuves vendues en France	
En 2010	233 gCO ₂ /veh.km
En 2025	159 gCO ₂ /veh.km
En 2030	147 gCO ₂ /veh.km
En 2040	124 gCO ₂ /veh.km
En 2055	112 gCO ₂ /veh.km

III. Le contenu CO₂ du km.pax en avion

La méthode Bilan Carbone a établi des facteurs d'émission par km.pax en avion à partir des « consommations par kilomètre » des avions fournis par les principaux constructeurs, divisées par le nombre de sièges occupés. Le taux d'occupation moyen des avions pris en compte est de 75%. Une pondération entre les sièges de première, classe affaire et seconde permet d'intégrer le fait que les premiers prennent plus de place que les seconds et troisièmes.

Sur des vols courts courriers (considérés pour GPSO), les émissions de CO₂ générées sont de 135 gCO₂/km.pax, dont 125 gCO₂ d'émissions directes et 10 gCO₂ d'émissions amont (extraction – raffinage).

A cela s'ajoutent les effets de l'avion sur la troposphère. La combustion à haute altitude va perturber le cycle d'autres gaz à effet de serre (vapeur d'eau, eau condensée, Nox, méthane,...) jusqu'à doubler le forçage radiatif du seul CO₂ émis. Une forte incertitude réside sur l'importance de ces « effets secondaires ».

En attendant une meilleure connaissance du sujet, un facteur 2 est appliqué aux émissions de CO₂ de l'avion, ce qui porte l'impact global du km.pax à 260 geCO₂/km.pax en 2005.

Evolutions concernant le secteur aérien

En 2012, le transport aérien européen intègre le système d'échange des quotas de CO₂ (sur la base des quantités du seul CO₂ émis, sans tenir compte des « trainées de condensation »).

Le Conseil consultatif pour la recherche sur l'aéronautique en Europe (Acare) retient comme objectif une réduction de 50% des émissions de CO₂ par km.pax par rapport à la situation de 2000⁶.

En novembre 2011, un rapport de l'académie de l'air et de l'espace⁷ remet largement en question les objectifs annoncés par différents organismes aéronautiques (OACI, Constructeur, exploitants) d'une croissance neutre en carbone à partir de 2020 ou d'une division par 2 des émissions pour 2050.

⁶ <http://ec.europa.eu/research/growth/gcc/projects/acare-fp6.html>

⁷ <http://www.academie-air-espace.com/userfiles/Xec%20summary%20vf3.pdf>

Il suggère en revanche un gain en efficacité par km.pax de l'ordre de 40% en 2050 par rapport à la situation de 2010. Ce gain se décompose en plusieurs évolutions qui sont :

- ✓ 25% grâce aux moteurs et à l'avionique,
- ✓ 8% grâce à une meilleure gestion du trafic aérien,
- ✓ 8,7% grâce à un meilleur remplissage des avions,
- ✓ 4,7% grâce au recours aux biocarburants.

Avec un taux de remplissage déclaré pour 2005-2006 de 80% chez Air France – KLM⁸, on envisage déjà un gain en 2010 de l'ordre de 5% par rapport au facteur d'émission proposé par la méthode Bilan carbone en 2007 (avec des taux de remplissage moyen de 75%), à savoir 247 geCO₂/km.pax en 2010.

Avec la projection proposée par l'académie de l'air et de l'espace, l'impact du transport aérien serait ramené à 150 geCO₂/km.pax en 2055.

On retiendra les valeurs correspondantes suivantes pour les dates pivots des études socio-économiques du programme GPSO :

Evolution du contenu CO ₂ des km.pax en avion	
En 2010	247 gCO ₂ /km.pax
En 2025	223 gCO ₂ /km.pax
En 2030	203 gCO ₂ /km.pax
En 2040	162 gCO ₂ /km.pax
En 2055	150 gCO ₂ /km.pax

IV. **La consommation des trains**

A. *La consommation des TGV*

Les différentes sources sont en septembre 2009 :

- valeur retenue par INEXIA pour la réalisation du volet exploitation du bilan Carbone de la LGV Rhin Rhône d'une consommation d'un TGV Duplex en unité simple (US) pour une conduite en grande vitesse de 20 kWh/km. Cette consommation est la résultante de la consommation globale (auxiliaires compris) qui comprend 8h de circulation sur le réseau LGV, 6 h d'attente en gare et 10 h de stationnement par jour. Cela concerne des convois pesant 390 tonnes ;
- échanges intervenus à l'occasion de travaux sur le contenu carbone des projets de LGV SEA et BPL, conduisant à arrêter les valeurs de consommation suivantes pour les différentes configurations de convois rencontrées :

⁸ <http://www.afklm-newsaffaires.fr/fre/L-Actualite/Le-Developpement-Durable>

- ✓ 24 kWh/km pour un TGV en service grande vitesse (320 km/h) en unité simple (US)
- ✓ 35 kWh/km pour un TGV en service grande vitesse (320 km/h) en unité multiple (UM)
- ✓ 12 kWh/km pour un TGV en service sur les zones de raccordement en US
- ✓ 17,5 kWh/km pour un TGV en service sur les zones de raccordement en UM

Des AGV permettraient un gain de l'ordre de 3% et le potentiel lié aux améliorations sur la gestion du trafic sur le réseau ferroviaire (fluidité) serait de l'ordre de 5 à 10%. Ce dernier point paraît en cohérence avec le programme en cours chez RFF de modernisation de l'outil de conduite du réseau qui s'étale sur la décennie à venir.

On retiendra les valeurs suivantes :

Consommation des trains en 2010	
TGV US Ligne classique	12,0 kWh/km
TGV US LGV	24,0 kWh/km
TGV UM Ligne classique	17,5 kWh/km
TGV UM LGV	35,0 kWh/km

B. La consommation des TER

Une étude réalisée en région a permis d'établir les consommations moyennes par type de matériel Diesel dans des « conditions standards » d'utilisation (sur la base de relevés de consommation ramenés au kilométrage reconstitué de chaque matériel à partir de l'activité ferroviaire du réseau TER sur la même période).

Les « conditions standards » liées à ces données recouvrent de l'utilisation sur des lignes variées qui mêlent des interstations allant de 7 à 55 km et des vitesses de circulation moyenne allant de 50 à 100 km/h (arrêt compris). Une forte dispersion (allant de 1 à 3 en termes de consommation par km) de ces données est attendue selon les conditions réelles d'utilisation.

Matériel	consommation	équivalent électrique
B81500	1,2 ltr/km	4,1 kWh/km
X2100	0,8 ltr/km	2,6 kWh/km
X72500	1,7 ltr/km	5,6 kWh/km
X73500	0,8 ltr/km	2,7 kWh/km
BB67400	2,3 ltr/km	7,6 kWh/km

Le retour d'expérience sur différentes études concernant le trafic TER a amené à modéliser la consommation unitaire (litre/km) de ce trafic selon 2 paramètres : la masse du convoi et le nombre d'arrêts. L'équation arrêtée à ce stade est la suivante :

- ✓ $C_1 = \text{Racine (masse)} / 17$ où la masse s'exprime en tonne et le résultat C_1 s'exprime en litre/km et correspond à la consommation en vitesse de croisière.

A ce terme on rajoute l'énergie nécessaire au démarrage en gare, pour porter le convoi à une vitesse de 100 km/h avec un rendement moteur de 33% :

$$\checkmark C_2 = 1/2 m V^2$$

Enfin, on rajoute le temps d'attente à chaque arrêt hors terminus et gare de départ :

$$\checkmark C_3 = 0,5 \text{ litres/arrêt}$$

A ces consommations de « service voyageur » est ajoutée une consommation connexe pour les temps de préparation et d'attente entre le dépôt et les gares de départ ou de terminus des missions, qui représente de l'ordre de 10% des premières.

Cette méthodologie de calcul conduit à retenir pour les TER à l'échelle d'une région les consommations moyennes suivantes :

	Consommation Diesel	Equivalent électrique
TER Diesel – 2010	1,54 ltr/km	5,13 kWh/km
TER Electrique – 2010	-	7,33 kWh/km

On notera que les trains diesel consomment moins d'énergie. C'est principalement parce qu'il s'agit de trains plus petits qui desservent les lignes secondaires.

C. La consommation des trains grandes lignes

Le train Hendaye – Toulouse sera assimilé à un TER électrique.

D. La consommation des SRGV

Les SRGV sont des trains régionaux à grande vitesse. Ils sont plus légers que les TGV.

A défaut d'autres informations, on retiendra une hypothèse entre la consommation des TER et celle des TGV, à savoir 15 kWh/km qui intègre à la fois un nombre d'arrêts (et de redémarrage) important et un poids très allégé par rapport au TGV classique.

Les grands axes du bilan carbone des lignes nouvelles

I. La phase construction – 7750 teCO₂/km en 2012

Le contenu CO₂ de l'infrastructure projetée a été évalué à partir des quantitatifs les plus détaillés disponibles à l'issue de l'étape 2 (mises au point du tracé en 2012). Les éléments quantitatifs descriptifs du projet sont rassemblés au sein de la base Arc en Ciel développée par RFF (base utilisée pour l'estimation du projet). Un module « Bilan carbone » a été constitué à cette occasion. Il permet d'automatiser la compilation des éléments CO₂ d'un projet à partir du bilan carbone unitaire de chaque ligne du quantitatif utilisé.

Les principaux résultats (exprimés en teCO₂) sont reproduits dans le tableau ci-dessous :

référence projet	teCO ₂ issues du béton				teCO ₂ issues du		tonne de CO ₂ ex-chaux et liant (traitement sol)	teCO ₂ issues de l'acier					teCO ₂ total	
	Assainissement et traversées hydrauliques	Ouvrages d'art courants	Ouvrages d'art non courants	Equipements ferroviaires	Terrassement	Autre		Assainissement et traversées hydrauliques	Ouvrages d'art courants	Ouvrages d'art non courants	Autre (séparateur GEFRA)	Equipements ferroviaires		
section courante														
Tronçon B2	3 368	4 529	7 478	3 918	25 936	3 130	7 816	1 045	3 315	12 452	-	16 881	110 964	
Tronçon B3	3 681	4 238	12 384	4 725	34 181	3 775	3 519	1 100	3 150	21 011	-	20 752	128 264	
Tronçon T1	3 534	3 728	3 540	4 169	22 067	2 614	14 459	935	2 666	5 262	-	18 049	94 241	
Tronçon T2	3 316	6 019	3 088	3 327	44 237	3 548	24 676	770	4 687	5 507	-	14 621	124 908	
Tronçon T3	5 813	7 415	24 288	3 202	32 617	4 688	45 633	393	6 086	24 440	-	14 185	181 393	
Tronçon T4	1 064	4 264	18 311	1 294	12 870	3 220	16 783	52	3 500	31 877	-	5 732	104 699	
Tronçon T5	1 656	4 150	7 735	2 157	25 535	2 502	14 649	147	3 375	6 783	1 106	9 435	86 522	
Tronçon T6	2 970	9 132	62 379	4 347	42 556	7 218	67 983	328	7 529	59 014	722	19 139	300 519	
Tronçon T7	2 488	7 612	9 029	3 912	40 804	5 079	67 702	399	6 843	15 581	866	17 214	190 965	
Tronçon T8	43	-	2 551	516	3 835	416	6 266	8	-	4 639	-	2 288	22 352	
Tronçon T9	640	598	6 906	1 037	9 836	963	12 111	65	578	5 579	-	4 595	46 516	
Tronçon E1	5 302	4 506	4 656	5 622	30 910	3 887	7 079	1 540	3 422	8 468	-	24 729	118 436	
Tronçon E2	3 980	5 311	11 831	5 009	36 782	4 342	6 752	1 073	4 151	21 385	1 432	22 073	141 283	
Tronçon E3	3 710	5 990	5 526	4 506	35 700	3 995	7 570	1 100	4 818	10 051	-	19 484	117 607	
Tronçon S1	6 683	14 559	1 483	4 348	40 217	6 186	9 873	234	11 862	2 345	-	18 785	131 671	
Tronçon S2	7 112	15 849	40 003	4 688	35 400	7 556	13 213	583	12 634	67 948	961	20 532	245 036	
Tronçon S3	883	403	54 988	1 392	7 747	3 636	-	242	264	52 519	-	6 048	135 918	
Tronçon S4	2 717	2 259	60 956	2 487	35 939	4 712	-	833	1 689	70 601	-	10 479	203 957	
Tronçon S5	829	2 170	70 956	1 396	7 254	5 097	-	178	1 703	54 299	-	6 186	159 119	
Tout GPSO	59 790	102 732	408 090	62 053	524 424	76 566	326 084	11 026	82 273	479 760	5 087	271 207	2 644 369	
Les raccordements	6 755	8 500	13 423	7 019	27 006	5 216	6 220	505	7 262	14 482	-	28 415	161 595	
Les gares	179	-	535	2 270	451	447	16	34	-	2 923	-	7 926	36 251	
Les bases travaux	3 659	840	840	2 576	14 861	1 220	133	108	556	917	-	9 264	62 373	

On totalise ainsi pour l'ensemble des opérations couvertes par le projet de ligne nouvelle, de l'ordre de 2,9 millions de teCO₂ dont 91% concernent la section courante. A ce bilan matière, il convient de rajouter les frais généraux carbone et quelques émissions connexes non prises en compte par Arc en Ciel, tel le changement d'affectation des sols. Cela représente de l'ordre de 1 000 teCO₂/km de ligne nouvelle, soit 430 000 teCO₂ pour l'ensemble du projet.

Il ressort un bilan global de construction de l'ordre de 3,33 millions de teCO₂ pour l'ensemble de l'opération, soit une valeur très proche de l'estimation au ratio établie à 3,2 MteCO₂ à l'issue de l'étape 2.

La prise en compte de la dimension CO₂ aux prochaines étapes du projet, par exemple au travers de l'existence d'un fonds d'arbitrage carbone, permettra d'orienter l'ingénierie vers des solutions bas carbone (cf. dispositif introduit pour la LGV Bretagne – Pays de la Loire).

C'est en s'inspirant de cette approche méthodologique pour les phases amont du projet que pourra être réduite encore l'empreinte climatique du GPSO.

Incidences du calendrier des investissements

La réalisation d'un km de LN générera de l'ordre de 7750 teCO₂ si elle intervient aux horizons de 2020.

Les politiques énergie-climat mises en place au niveau européen permettront d'améliorer le process industriel sur la production de la chaux, du ciment et des aciers. A ce stade, compte tenu des progrès techniques et conditions de production, on propose de retenir un gain de l'ordre de 10% sur les facteurs d'émission de l'acier et des liants hydrauliques d'ici l'horizon 2030-2040. Compte tenu du poids de ces facteurs d'émission dans celui d'une LGV globale, cela se traduirait directement par un gain de l'ordre de 5% sur le contenu CO₂ d'une LGV.

D'autre part, on envisage un gain supplémentaire de 5% grâce à une meilleure prise en compte de la dimension CO₂ par les chantiers (nouveaux procédés de construction, arbitrage CO₂ systématique dans les études d'ingénierie).

On propose donc de chiffrer les travaux comme indiqué dans le tableau ci-dessous :

Evolution du contenu CO ₂ d'un km de LN	
En 2010	7750 teCO ₂ /km
En 2025	7350 teCO ₂ /km
En 2030	7000 teCO ₂ /km

En termes d'émissions cela se traduira par l'échéancier suivant :

GPSO	référence	Linéaire en service	Emissions générées
2024	0 km LN	221 km LN	1 624 350 teCO ₂
2027	0 km LN	325 km LN	738 400 teCO ₂
2032	0 km LN	417 km LN	634 800 teCO ₂
			2 997 550 teCO ₂

Les gains en efficacité CO₂ envisageables à terme représentent de l'ordre de 50 000 teCO₂ sur l'ensemble du programme, par rapport à une mise en service complète en 2023.

II. La phase exploitation

L'exploitation englobe plusieurs postes d'émission : la maintenance de l'infrastructure, l'entretien des voies, les programmes de renouvellement des voies et ballast (RVB), le suivi des ouvrages d'art,... mais également la production et la maintenance du matériel roulant ainsi que le fonctionnement des gares. Elle englobe également le poste le plus important : l'énergie de traction et les trajets des usagers pour se rendre en gare.

A. *Energie de traction – +4 000 à 20 000 teCO2/an en 2024 - +7000 teCO2 en 2055*

L'énergie de traction s'évalue à partir de trois jeux d'hypothèses : a) les circulations ferroviaires engendrées par cette nouvelle configuration de réseau, b) la consommation du matériel roulant, c) le contenu carbone de l'électricité consommée par les motrices.

a) *Les nouvelles circulations ferroviaires*

L'étude socio-économique détaille l'ensemble des relations ferroviaires liées au GPSO en situation de référence et en situation de projet selon l'échéancier des mises en service successives. Ces données sont reprises avec cumul des train.km parcourus par type de matériel et selon les parcours (si une étape au moins est parcourue sur un tracé du GPSO), et traduction de ces train.km en consommation d'électricité pour l'énergie de traction.

Trafic ferroviaire aux différents horizons en milliers de train.km / an (TGV, SRGV)

En milliers de train.km / an	Référence 2024	Projet 2024	Référence 2027	Projet 2027	Référence 2032	Projet 2032
TGV US sur ligne classique	8200	3170	5850	1940	2090	3490
SRGV US sur ligne classique	0	0	0	60	0	100
TGV US sur LGV	12500	15250	7760	8540	7630	12210
SRGV US sur LGV	0	0	0	430	0	680
TGV UM sur ligne classique	3340	3520	5800	5940	9450	6300
SRGV UM sur ligne classique	0	0	0	0	0	0
TGV UM sur LGV	7500	10910	12890	20120	16360	25620
SRGV UM sur LGV	0	0	0	0	0	0
Ensemble du trafic	31540	32850	32300	37030	35530	48400

Le tableau montre une augmentation des train.km en fonction de l'horizon d'une part (les circulations augmentent de 31 à 35 Millions de train.km/an entre 2024 et 2032 en référence), entre référence et projet d'autre part (l'augmentation des circulations est de un peu moins de 2 millions de trains.km en 2024 entre référence et projet, elle est proche de 13 Millions de train.km en 2032).

Si on regarde plus précisément les évolutions entre trains simples et doubles, entre circulation sur ligne classique et sur ligne nouvelle, les tendances générales sont :

- une augmentation des circulations sur LGV en projet par rapport à la référence,
- une augmentation du nombre de train.km qui évolue peu entre référence et projet en 2024, car le schéma d'offre en projet est finalement assez proche de celui en référence,
- une augmentation plus forte en 2027 et surtout 2032, avec la création de nouvelles circulations internationales et Sud-Sud, ce qui se traduit par plus de train.km.

L'évolution tendancielle en référence est une augmentation du taux d'UM/US : peu d'évolution des fréquences mais renforcement de la capacité d'emport. Ainsi on observe surtout une réduction des trains US sur LC entre référence 2024 et projet 2024, alors que l'on enregistre plutôt une réduction des trains UM sur LC entre référence et projet 2032.

Les hypothèses sur le matériel roulant sont décrites en première partie de ce document. Une équation simplifiée décrivant la consommation selon le kilométrage parcouru est retenue pour le calcul (sans détail du nombre d'arrêts, avec une traction exclusivement électrique pour l'ensemble des trains).

La consommation unitaire des trains est supposée constante dans le temps de 2024⁹ à 2055. La synthèse ci-contre en est déduite :

**Energie de traction par année en situation de référence
et de projet aux horizons 2024, 2027, 2032 et 2055**

GPSO	référence	projet	évolution projet/réf
2024	417 GWh	503 GWh	86 GWh
2027 ⁻	425 GWh	515 GWh	89 GWh
2027 ⁺	420 GWh	535 GWh	115 GWh
2032 ⁻	436 GWh	560 GWh	124 GWh
2032 ⁺	450 GWh	632 GWh	182 GWh
2040	474 GWh	673 GWh	198 GWh
2055	519 GWh	753 GWh	234 GWh

Les principales évolutions entre la situation de référence et la situation de projet sont les suivantes (par ordre décroissant d'importance) :

- développement fort d'un nouveau trafic TGV ;
- transfert d'un nombre significatif de train.km en TGV qui circuleront dorénavant à 320 km/h ;
- évolution liée à l'apparition d'un service régional à grande vitesse (SRGV) ;

L'écart sur les TER restant modeste n'est pas détaillé.

L'échéancier des travaux met en évidence une augmentation régulière de la consommation doublée de rehausses brutales de consommation à l'occasion des mises en service successives :

- +86 GWh lors de la mise en service de la LN Bordeaux-Toulouse en 2024 ;
- +26 GWh pour la mise en service de la section Sud Gironde – Dax en 2027 ;
- +58 GWh à l'aboutissement du programme avec la mise en service de la section Dax – Espagne en 2032.

b) Le contenu carbone de l'électricité

Les hypothèses sur le contenu CO₂ de l'électricité sont décrites en première partie de ce document. L'issue (2055) est la même que l'on prenne de l'électricité française ou européenne.

⁹ Compte tenu des mises en services successives – 2024 vers Toulouse, 2027 vers Dax et 2032 pour la section Dax-Espagne

Surplus d'émissions liées à l'énergie de traction

GPSO	Elec France	Elec EU 27	Elec GPSO
2024	4 454 teCO2	22 098 teCO2	12 934 teCO2
2027	4 249 teCO2	18 876 teCO2	11 362 teCO2
2027*	5 445 teCO2	24 186 teCO2	14 557 teCO2
2032	5 206 teCO2	18 715 teCO2	11 774 teCO2
2032*	7 637 teCO2	27 457 teCO2	17 274 teCO2
2040	7 937 teCO2	17 858 teCO2	12 897 teCO2
2055	7 024 teCO2	7 024 teCO2	7 024 teCO2
Cumul 2023 - 2055	218 530 teCO2	557 070 teCO2	384 511 teCO2

Il convient de noter que le projet de LGV Tours-Bordeaux est mis en service dans la situation de référence. Le flux de voyageurs arrivant à Bordeaux est déjà dans une situation significativement différente de celle connue aujourd'hui.

Le trafic augmente, la consommation du matériel roulant également. C'est le contenu carbone de l'électricité qui diminue et permet au projet de réduire l'impact « énergie de traction » dans le temps.

En cumulé de 2025 jusqu'en 2055, ce sont de l'ordre de 385 000 teCO2 qui seront rajoutées à l'atmosphère si on se place dans une hypothèse d'électricité « GPSO ».

Ce même volume est ramené à 220 000 teCO2 si on prend en compte de l'électricité française.

Il est porté à 557 000 teCO2 si on prend en compte de l'électricité européenne.

Pour mémoire, dans le cas du projet réalisé totalement dès 2025, le résultat est rappelé ci-dessous :

En cumulé de 2025 jusqu'en 2055, ce sont de l'ordre de 440 000 teCO2 qui seront rajoutées à l'atmosphère si on se place dans une hypothèse d'électricité « GPSO ».

Ce même volume est ramené à 240 000 teCO2 si on prend en compte de l'électricité française.

Il est porté à 640 000 teCO2 si on prend en compte de l'électricité européenne.

B. Les trajets amont des nouveaux passagers

Il s'agit de tenir compte des nouveaux voyageurs qui viendront en voiture à la gare. Les gares nouvelles TGV ne sont pas situées en centre-ville et une part importante des voyageurs s'y rend en voiture individuelle. D'une manière générale, ce trajet en voiture génère plus de CO₂ que le voyage en train que parcourt ensuite le voyageur.

Que ce soit en 2024 ou 2055, quelle que soit la partie de programme étudié, les hypothèses retenues pour le calcul restent les mêmes :

- près de 37% des usagers du train utilisent une voiture pour se rendre ou quitter la gare ;

- ils parcourent en moyenne près de 25 km en voiture pour le rabattement et/ou la diffusion aux gares (32 km pour rejoindre un TGV, 23 km pour rejoindre un train grande ligne ou un SRGV, 13 km pour rejoindre un TER).

Le tableau ci-après présente les veh.km parcourus pour motifs de rabattement et de diffusion aux dates pivots du programme.

GPSO	référence	projet	évolution projet/réf
2024	381 Mveh.km	435 Mveh.km	54 Mveh.km
2027 ⁻	392 Mveh.km	447 Mveh.km	55 Mveh.km
2027 ⁺	392 Mveh.km	489 Mveh.km	98 Mveh.km
2032 ⁻	418 Mveh.km	522 Mveh.km	104 Mveh.km
2032 ⁺	443 Mveh.km	559 Mveh.km	116 Mveh.km
2055	552 Mveh.km	702 Mveh.km	150 Mveh.km

Le bilan dépend des émissions attendues pour les voitures individuelles sur ces mêmes horizons, telles que décrites dans la première partie.

GPSO	référence
2024	8 570 teCO ₂
2027 ⁻	8 109 teCO ₂
2027 ⁺	14 972 teCO ₂
2032 ⁻	14 812 teCO ₂
2032 ⁺	16 550 teCO ₂
2055	16 779 teCO ₂

Cumul 2023 - 2055	491 103 teCO ₂
-------------------	---------------------------

L'impact de ces trafics routiers viendra progressivement avec les mises en service successives.

En cumul, les émissions de CO₂ générées par les voitures se rendant aux gares sont du même ordre que celles générées par l'énergie de traction.

C. Maintenance de l'infrastructure - 2000 teCO₂/an

Ces émissions ne sont pas estimées dans le détail à ce stade d'avant-projet. Ces volumes ont déjà été analysés dans des projets plus aboutis (cf. Bilan Carbone de la LGV Rhin Rhône, avec des émissions annuelles estimées à 4,75 tonnes de CO₂ par km de LGV). Elles sont composées pour l'essentiel de :

- ✓ 38% d'utilisation de voiture de service pour se rendre sur site et réaliser les visites d'inspections,
- ✓ 30% de consommation de carburant pour le matériel de voie (ballastage, bourrage, meulage, désherbage,...),
- ✓ 20% de consommation d'énergie dans les bâtiments rattachés à cette activité,
- ✓ 12% générés par la production des matériaux mis en œuvre.

Selon l'échéancier de mise en service, les émissions annuelles évoluent comme suit entre 2024 et 2055 :

GPSO	Linéaire en service	teCO2 par an
2024	221 km LN	1 050 teCO2
2027 ⁻	221 km LN	1 050 teCO2
2027 ⁺	325 km LN	1 544 teCO2
2032 ⁻	325 km LN	1 544 teCO2
2032 ⁺	417 km LN	1 981 teCO2
2055	417 km LN	1 981 teCO2

Cumul 2023 - 2055	57 475 teCO2
-------------------	--------------

D. Matériel roulant (amortissement et maintenance) - 0,63 gCO₂/voy.km

Ces émissions ne sont pas estimées dans le détail à ce stade d'avant-projet. Ces volumes ont déjà été analysés dans des projets plus aboutis. Les principaux enseignements sont les suivants :

a) Fabrication du matériel roulant

A ce stade, on retiendra l'approche adoptée dans le bilan carbone de la LGV Rhin Rhône.

Pour fabriquer une tonne de rame de TGV, il faut mettre en œuvre :

- ✓ 3,6 tonnes CO₂/tonne de matériel roulant pour produire les matériaux constitutifs des rames ;
- ✓ 2,5 tonnes CO₂/tonne de matériel roulant pour procéder à l'assemblage de l'ensemble ;
- ✓ 40 ans pour amortir ce matériel.

Ainsi une rame TGV Duplex pesant 390 tonnes et comportant 545 places génère de l'ordre de 2 400 tonnes de CO₂. Son amortissement sur 40 ans commande d'amortir une charge annuelle de 60 tonnes de CO₂ par an.

A raison de 8h de circulation quotidienne, chaque rame parcourt entre 350 000 km et 400 000 km par an. C'est donc de 170 à 150 g de CO₂ par train.km qu'il faut amortir.

Avec un taux de remplissage moyen de 60% (option minimaliste en TGV), il y a lieu de répartir ces émissions sur 330 passagers, soit près de 0,5 gCO₂/voy.km. On considère qu'à ce stade, il n'y a pas lieu d'attendre d'évolution majeure dans ces émissions d'ici 2050, sauf à faire rouler les TGV beaucoup plus (option non retenue ici).

b) Maintenance du matériel roulant

Pour compléter les émissions liées au matériel roulant, il convient de prendre en compte les émissions dues à la maintenance de ces engins.

Un Technicentre TER régional a fait l'objet d'un bilan carbone. Il traitait environ 25 000 tonnes de matériel (engins de traction électrique et diesel, wagon simple...) pour une émission de l'ordre de 1 000 teCO₂ par an (chauffage, pièces détachées, consommables, déchets,...).

Selon le même mode de calcul que décrit ci avant, une rame de 400 tonnes engendrerait 16 tonnes de CO₂ de « maintenance », soit 0,13 gCO₂/voy.km.

A l'occasion de la réalisation du bilan carbone de la LGV Rhin Rhône, le Bilan Carbone du Technicentre Est européen en charge de la maintenance de 52 rames, a fait état de 900 teCO₂ émises par an (70% pour l'énergie du bâtiment, 10% pour les consommables, 12% pour les déchets, 8% pour l'amortissement du bâtiment). Cela représente 17 tonnes de CO₂ par rame, valeur proche de celle déjà visée ci avant.

c) Emissions générées selon l'échéancier du programme

Les voy.km supplémentaires à chaque date pivot sont extraits des études socio-économiques aux dates correspondantes :

GPSO	évolution projet/réf	teCO ₂ par an
2024	2 012 Mvoy.km	1 268 teCO ₂
2027 ⁻	2 114 Mvoy.km	1 332 teCO ₂
2027 ⁺	3 282 Mvoy.km	2 068 teCO ₂
2032 ⁻	3 574 Mvoy.km	2 251 teCO ₂
2032 ⁺	4 346 Mvoy.km	2 738 teCO ₂
2055	5 890 Mvoy.km	3 711 teCO ₂

Cumul 2023 - 2055	90 159 teCO ₂
-------------------	--------------------------

E. Services aux voyageurs – 2 gCO₂/voy.km

Ces émissions ne sont pas estimées dans le détail à ce stade d'avant-projet. Il s'agit pour l'essentiel des émissions liées au fonctionnement des gares.

On retiendra pour cette approche 2 gCO₂/voy.km.

On envisage que ces émissions baisseront progressivement pour atteindre 1 gCO₂/voy.km en 2040 et 0,5 gCO₂/voy/km en 2055, en particulier grâce à l'amélioration de la qualité thermiques du patrimoine bâti de la SNCF.

GPSO	évolution projet/réf	teCO ₂ par an	gCO ₂ /voy.km
2024	2 012 Mvoy.km	3 018 teCO ₂	1,5 gCO ₂ /voy.km
2027 ⁻	2 114 Mvoy.km	2 748 teCO ₂	1,3 gCO ₂ /voy.km
2027 ⁺	3 282 Mvoy.km	4 267 teCO ₂	1,3 gCO ₂ /voy.km
2032 ⁻	3 574 Mvoy.km	3 574 teCO ₂	1,0 gCO ₂ /voy.km
2032 ⁺	4 346 Mvoy.km	4 346 teCO ₂	1,0 gCO ₂ /voy.km
2055	5 890 Mvoy.km	2 945 teCO ₂	0,5 gCO ₂ /voy.km

Cumul 2023 - 2055	125 707 teCO ₂
-------------------	---------------------------

III. Le report modal

L'évolution de l'offre ferroviaire doit permettre plusieurs évolutions dans la clientèle :

- les clients actuels seront fidélisés. Ils resteront le plus gros contingent des usagers en situation de projet ;
- une nouvelle clientèle va se former, décomposée en trois sous-groupes :
 - ✓ ceux qui ne voyageaient pas précédemment, et qui profitent de cette nouvelle infrastructure pour se déplacer (induction de trafic) ;
 - ✓ ceux qui prenaient la voiture précédemment, mais qui compte tenu de l'offre proposée qui leur correspond mieux, ne prennent plus la voiture mais le train (cela reste une fraction faible du trafic automobile sur ces axes) ;
 - ✓ Ceux qui prenaient l'avion précédemment, mais qui compte tenu de l'offre proposée qui leur correspond mieux, ne prennent plus l'avion mais le train.

Ce sont ces deux derniers points qui sont évalués ici, le report modal entraînant une baisse du trafic routier et du trafic aérien.

A. Le report depuis l'avion

A ce niveau, deux postes sont concernés : le transport aérien et les trajets des passagers en voiture pour se rendre aux aéroports. Les trajets en TC sont considérés comme négligeables.

Report modal – trajets en avion

Ce chiffrage du report modal en avion repose sur des hypothèses d'évolution du trafic aérien selon les principales lignes françaises et européennes impactées par le GPSO.

Il se décrit rapidement comme suit :

- en 2024, avec l'ouverture de la LGV jusqu'à Toulouse, de l'ordre de 1 million de passagers ne parcourent plus 680 km en avion ;
- en 2027, avec l'ouverture de la ligne jusqu'à Dax, environ 1,3 million de passagers ne parcourent plus 680 km en moyenne ;
- en 2032, avec l'achèvement du programme vers l'Espagne, 1,7 million de passagers ne parcourent plus 750 km en avion pour emprunter les voies du GPSO.

Le tableau ci-après présente les voy.km qui ne seront plus réalisés en avion aux dates pivots du programme. Il indique également à ces dates, le gain CO₂ correspondant.

GPSO	Report modal	évolution projet/réf	teCO ₂ par an	gCO ₂ /voy.km
2024	+0,9 Mvoy	-566 Mvoy.km	-126 163 teCO ₂	223 gCO ₂ /voy.km
2027	+1 Mvoy	-597 Mvoy.km	-127 117 teCO ₂	213 gCO ₂ /voy.km
2027 ⁺	+1,3 Mvoy	-829 Mvoy.km	-176 351 teCO ₂	213 gCO ₂ /voy.km
2032	+1,3 Mvoy	-937 Mvoy.km	-182 212 teCO ₂	195 gCO ₂ /voy.km
2032 ⁺	+1,7 Mvoy	-1 287 Mvoy.km	-250 271 teCO ₂	195 gCO ₂ /voy.km
2055	+2 Mvoy	-1 871 Mvoy.km	-280 650 teCO ₂	150 gCO ₂ /voy.km

	Cumul 2024 - 2055	-7 508 562 teCO ₂
--	-------------------	------------------------------

On applique à ces voy.km un facteur d'émission évolutif qui doit refléter de quelle manière le trafic aérien évoluera dans les prochaines décennies. Le transport aérien en relation avec l'Europe aurait dû être intégré au système de quotas de CO₂ au même titre que l'industrie, à partir de 2012, mais ce projet n'a pas fait l'objet d'application à ce jour et n'est donc pas pris en compte dans les calculs.

Compte tenu de ces hypothèses, cela représente de l'ordre de 125 000 teCO₂/an en 2025, avec une évolution vers 250 000 teCO₂/an en 2032 puis 280 000 teCO₂/an en 2055.

Trajets supprimés vers les aéroports

Les passagers décrits ci-avant reportés de l'avion n'effectuent plus les trajets vers ou depuis les aéroports. Cela représente de l'ordre de 30 millions de veh.km supprimés en 2025, 65 millions de veh.km en 2032 et 82 millions de veh.km en 2055.

GPSO	évolution projet/réf	teCO ₂ par an	gCO ₂ /voy.km
2024	-31 Mveh.km	-4 977 teCO ₂	159 gCO ₂ /veh.km
2027	-34 Mveh.km	-5 147 teCO ₂	153 gCO ₂ /veh.km
2027 ⁺	-41 Mveh.km	-6 277 teCO ₂	153 gCO ₂ /veh.km
2032	-54 Mveh.km	-7 744 teCO ₂	143 gCO ₂ /veh.km
2032 ⁺	-65 Mveh.km	-9 235 teCO ₂	143 gCO ₂ /veh.km
2055	-82 Mveh.km	-9 221 teCO ₂	112 gCO ₂ /veh.km

Cumul 2024 - 2055	-253 186 teCO ₂
-------------------	----------------------------

Avec la même hypothèse que celle présentée précédemment sur le contenu carbone de la voiture individuelle, le bilan carbone de ce trafic supprimé s'élève à 5 000 teCO₂ en 2025, puis évoluera à 9200 teCO₂ en 2032 et restera à ce niveau (9200 teCO₂) en 2055 (hausse du kilométrage supprimé, croisée avec une meilleure efficacité carbone des voitures).

B. Le report de personnes depuis la route – 105 000 teCO₂

Le report modal depuis la route est détaillé dans les études socio-économiques selon 3 catégories de trafic : dense, campagne et diffus. La synthèse de ces évaluations est la suivante :

- en 2024, avec l'ouverture de la LGV jusqu'à Toulouse, de l'ordre de 0,8 million de voitures ne parcourent plus 320 km en moyenne ;
- en 2027, avec l'ouverture de la ligne jusqu'à Dax, environ 2 millions de voitures ne parcourent plus 335 km en moyenne ;
- enfin en 2055, avec la configuration complète du GPSO, près de 2,6 millions de voitures ne parcourent plus 364 km en moyenne.

Le tableau ci-après présente les veh.km qui seront supprimés aux dates pivots du programme. Il indique également à ces dates, le gain CO₂ correspondant.

GPSO	Report modal	évolution projet/réf	teCO2 par an	gCO2/voy.km
2024	+1,2 Mvoy	-251 Mveh.km	-39 430 teCO2	157 gCO2/veh.km
2027	+1,3 Mvoy	-263 Mveh.km	-40 036 teCO2	152 gCO2/veh.km
2027 ⁺	+2,9 Mvoy	-608 Mveh.km	-93 036 teCO2	153 gCO2/veh.km
2032 ⁻	+3,0 Mvoy	-662 Mveh.km	-94 426 teCO2	143 gCO2/veh.km
2032 ⁺	+3,3 Mvoy	-755 Mveh.km	-107 597 teCO2	143 gCO2/veh.km
2055	+3,9 Mvoy	-973 Mveh.km	-108 916 teCO2	112 gCO2/veh.km
		Cumul 2024 - 2055	-2 947 546 teCO2	

C. Le report de transport de marchandises depuis la route

Le fret ferroviaire va également évoluer au travers de la disponibilité de sillons libérés. Cependant ceci n'interviendra qu'avec la réalisation de la section entre Dax et l'Espagne, les mises en services antérieures vers Toulouse et Dax n'entraînant pas de report notable pour le fret.

Sur l'ensemble du périmètre étudié par la modélisation de trafic, ce sont 700 000 train.km de fret en 2032 mais 7 600 000 trains.km en 2055 qui seront rajoutés suite à la réalisation de la totalité du programme GPSO. En effet le report modal reste modeste à l'ouverture de la liaison Dax – Espagne, mais au-delà de 2040 en situation de référence, la ligne classique atteint ses limites de capacité et la croissance de la demande est prise en charge par le transport routier. En situation de projet les nouvelles capacités offertes par la ligne nouvelle permettent d'absorber le surcroît de demande par voie ferrée. Cela générera un surcroît de consommation électrique (ajout de fret en traction électrique) et d'émission de l'ordre de 3 600 teCO₂ et 6 800 teCO₂ aux dates pivots, avec de l'électricité européenne (compte tenu de l'évolution favorable du contenu CO₂ de l'électricité utilisée).

Fret ferroviaire	évolution train.km 2032	évolution train.km 2055
Distance parcourue dans le triangle (Tours - Bayonne - Cerbère)	0,7 Mtrain.km	7,6 Mtrain.km
Consommation électrique (GWh/an)	22 GWh	228 GWh
Emissions générées (teCO2/an)	3 579 TeCO2	6 842 TeCO2

6,5 millions PL.km en 2032 et 185 millions de PL.km en 2055 sont ainsi retirés des routes par rapport à la situation de référence. A raison d'une consommation de 30 litres/100 km par les tracteurs routiers, et constante¹⁰ sur 30 ans, cela représente des émissions évitées de 6 000 teCO2/an en 2032 et 180 000 teCO2 en 2055.

¹⁰ Les perspectives d'amélioration des performances énergétiques des poids lourds restent très modérées : dans sa note sur l'évolution des transports interurbains à l'horizon 2025, le SESP tablait sur une réduction des émissions GES au PL.km limitée à 7% entre 2002 et 2025). Par ailleurs de récentes études (Agence Régionale Environnement et Climat de Poitou Charentes) ont montré que l'émission de GES rapportée au PL.km évolue peu : en effet l'amélioration des performances de

Le fret routier :	Ecart 2032	Ecart 2055
PL.km	- 6 426 298	- 184 028 838
Distance Route - triangle n°1	-6 221 TeCO2	-178 140 TeCO2

GPSO	évolution projet/réf	teCO2 par an	gCO2/voy.km
2024	0 Mveh.km	0 teCO2	968 gCO2/veh.km
2027	0 Mveh.km	0 teCO2	968 gCO2/veh.km
2027 ⁺	0 Mveh.km	0 teCO2	968 gCO2/veh.km
2032	0 Mveh.km	0 teCO2	968 gCO2/veh.km
2032 ⁺	-6 Mveh.km	-6 215 teCO2	968 gCO2/veh.km
2055	-184 Mveh.km	-178 140 teCO2	968 gCO2/veh.km

Cumul 2024 - 2055	-1 474 840 teCO2
-------------------	------------------

Le gain net serait de l'ordre de 6 000 teCO₂ en 2032 et de 178 000 teCO₂ en 2055.

moteurs est compensée par l'augmentation du tonnage des PL. La possibilité de faire circuler des poids lourds de plus grande capacité encore devrait conforter cette tendance. L'hypothèse d'un maintien de la consommation de carburant au PL.km est ainsi légitime à ce stade.

IV. **Éléments de synthèse : quel contenu carbone de la mobilité proposée par le GPSO ?**

L'investissement Carbone pour les lignes nouvelles du programme GPSO représente environ 3 000 000 teCO₂. En amortissant cette infrastructure sur 66 ans (moyenne entre du génie civil sur 100 ans, et des équipements ferroviaires renouvelés dès la trentième année), cela traduit l'investissement en CO₂ des travaux comme une charge de 25 000 teCO₂/an à partir de 2024, qui augmente à 36 000 teCO₂/an à partir de 2027 (ouverture de la section Sud Gironde – Dax) puis à 45 000 teCO₂/an à partir de 2032, en considérant la mise en œuvre complète des lignes nouvelles du programme GPSO.

Le tableau ci-dessous restitue les principaux volumes de CO₂ identifiés ci avant sur le périmètre d'étude du projet aux différents horizons de temps :

GPSO	2024 (MES - Toulouse)	2027 (avant MES Dax)	2027 (après MES Dax)	2032 (avant MES Espagne)	2032 (après MES Espagne)	2055
Construction	1 624 350 teCO ₂	0 teCO ₂	738 400 teCO ₂	0 teCO ₂	634 800 teCO ₂	0 teCO ₂
Construction en mode amortissement (sur 66 ans)	24 611 teCO ₂	24 611 teCO ₂	35 799 teCO ₂	35 799 teCO ₂	45 417 teCO ₂	45 417 teCO ₂
traction France	4 454 teCO ₂	4 249 teCO ₂	5 445 teCO ₂	5 206 teCO ₂	7 637 teCO ₂	7 024 teCO ₂
traction EU27	22 098 teCO ₂	18 876 teCO ₂	24 186 teCO ₂	18 715 teCO ₂	27 457 teCO ₂	7 024 teCO ₂
Traction GPSO	12 934 teCO ₂	11 362 teCO ₂	14 557 teCO ₂	11 774 teCO ₂	17 274 teCO ₂	7 024 teCO ₂
rab/dif gare	8 570 teCO ₂	8 109 teCO ₂	14 972 teCO ₂	14 812 teCO ₂	16 550 teCO ₂	16 779 teCO ₂
maintenance infra	1 050 teCO ₂	1 050 teCO ₂	1 544 teCO ₂	1 544 teCO ₂	1 981 teCO ₂	1 981 teCO ₂
matériel roulant	1 268 teCO ₂	1 332 teCO ₂	2 068 teCO ₂	2 251 teCO ₂	2 738 teCO ₂	3 711 teCO ₂
services aux voyageurs	3 018 teCO ₂	2 748 teCO ₂	4 267 teCO ₂	3 574 teCO ₂	4 346 teCO ₂	2 945 teCO ₂
Report modal avion	-126 163 teCO ₂	-127 117 teCO ₂	-176 351 teCO ₂	-182 212 teCO ₂	-250 271 teCO ₂	-280 650 teCO ₂
rab/dif aéroport	-4 977 teCO ₂	-5 147 teCO ₂	-6 277 teCO ₂	-7 744 teCO ₂	-9 235 teCO ₂	-9 221 teCO ₂
Report modal route	-39 430 teCO ₂	-40 036 teCO ₂	-93 036 teCO ₂	-94 426 teCO ₂	-107 597 teCO ₂	-108 916 teCO ₂
Report modal Fret	0 teCO ₂	0 teCO ₂	0 teCO ₂	0 teCO ₂	-6 215 teCO ₂	-178 140 teCO ₂

On propose d'évaluer le contenu CO₂ de la prestation proposée, à savoir des voy.km. Il s'agit alors :

- d'additionner les émissions générées « en plus » par la « surproduction » de voy.km qu'entraîne le programme : L'amortissement des travaux, l'énergie de traction, les trajets routiers de rabattement et de diffusion, le matériel roulant, sa fabrication et sa maintenance, le service aux voyageurs : gare et autres bâtiments d'exploitation ;
- de diviser le total des émissions obtenues par le nombre de voy.km produit.

Cette approche présente le biais suivant : la surconsommation liée à l'augmentation de la vitesse des TGV sera imputée aux seuls voyageurs supplémentaires, et non pas à l'ensemble des voyageurs. Cela surévalue le bilan carbone de ces nouveaux passagers. En revanche, ceux qui prenaient le train précédemment et qui circulent maintenant plus rapidement conservent leur bilan carbone initial (de référence).

Le tableau suivant précise pour chaque date pivot, la production de voy.km supplémentaire et le contenu CO₂ de la prestation selon plusieurs hypothèses (origine de l'électricité, prise en compte ou non des trajets de rabattement et de diffusion en voiture) :

GPSO	2024 (MES - Toulouse)	2027 (avant MES Dax)	2027 (après MES Dax)	2032 (avant MES Espagne)	2032 (après MES Espagne)	2055
production supplémentaire de voy.km	1 976 Mvoy.km	2 085 Mvoy.km	3 282 Mvoy.km	3 574 Mvoy.km	4 346 Mvoy.km	5 890 Mvoy.km
production de voy.km sur le périmètre de l'énergie de traction	16 085 Mvoy.km	16 890 Mvoy.km	18 087 Mvoy.km	19 539 Mvoy.km	20 530 Mvoy.km	27 009 Mvoy.km
émissions générées (sans rabattement/diffusion) + elec EU27 :	26 gCO2/voy.km	23 gCO2/voy.km	21 gCO2/voy.km	17 gCO2/voy.km	19 gCO2/voy.km	10 gCO2/voy.km
émissions générées (avec rabattement/diffusion) :+ elec 27	31 gCO2/voy.km	27 gCO2/voy.km	25 gCO2/voy.km	21 gCO2/voy.km	23 gCO2/voy.km	13 gCO2/voy.km
émissions générées (avec rabattement/diffusion) + elec GPSO :	26 gCO2/voy.km	24 gCO2/voy.km	22 gCO2/voy.km	20 gCO2/voy.km	20 gCO2/voy.km	13 gCO2/voy.km
émissions générées (sans rabattement/diffusion) + elec GPSO :	22 gCO2/voy.km	20 gCO2/voy.km	18 gCO2/voy.km	15 gCO2/voy.km	17 gCO2/voy.km	10 gCO2/voy.km
émissions générées (avec rabattement/diffusion) + elec France :	22 gCO2/voy.km	20 gCO2/voy.km	20 gCO2/voy.km	18 gCO2/voy.km	18 gCO2/voy.km	13 gCO2/voy.km
émissions générées (sans rabattement/diffusion) + elec France :	17 gCO2/voy.km	16 gCO2/voy.km	15 gCO2/voy.km	14 gCO2/voy.km	14 gCO2/voy.km	10 gCO2/voy.km
émissions générées - traction France seul	2,3 gCO2/voy.km	2,0 gCO2/voy.km	1,7 gCO2/voy.km	1,5 gCO2/voy.km	1,8 gCO2/voy.km	1,2 gCO2/voy.km
émissions générées - traction EU 27 seul	11,2 gCO2/voy.km	9,1 gCO2/voy.km	7,4 gCO2/voy.km	5,2 gCO2/voy.km	6,3 gCO2/voy.km	1,2 gCO2/voy.km
émissions générées - traction GPSO seul	6,5 gCO2/voy.km	5,4 gCO2/voy.km	4,4 gCO2/voy.km	3,3 gCO2/voy.km	4,0 gCO2/voy.km	1,2 gCO2/voy.km

De 1,2 gCO₂/voy.km à 31 gCO₂/voy.km, la fourchette est large. Mais dans tous les cas de figure, la mobilité proposée reste en deçà du seuil de 37 gCO₂ pris comme étalon d'une mobilité durable pour 2050. Et cette approche ne s'appuie sur aucun report modal pour justifier de sa pertinence « climatique ».

Le service proposé est compatible 2050¹¹.

D'autres contraintes externes (raréfaction du pétrole, prise de conscience par la population et les politiques des enjeux climatiques...) pourraient aboutir à d'importantes restrictions dans l'utilisation de la voiture et de l'avion. Cette mobilité réduite qui pourrait nuire au dynamisme économique et social des territoires sera significativement allégée grâce au GPSO sans pour autant que ces derniers ne sacrifient à l'exigence de « durabilité climatique » du projet (maintien sous le seuil de 37 gCO₂/voy.km).

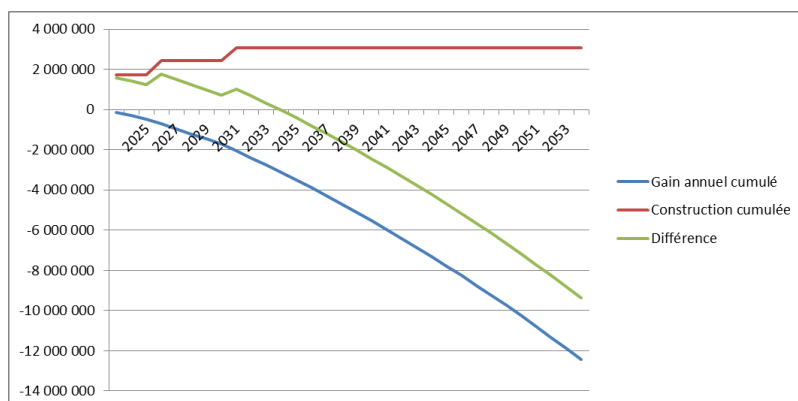
En intégrant le report modal à l'analyse (hypothèse électricité « GPSO »)

En 2027, il restera 1 MteCO₂ à rembourser pour équilibrer la charge de la première section Bordeaux – Toulouse ou chaque année, cette première tranche dégagera un bénéfice CO₂ de l'ordre de 200 000 tecO₂ par an.

En 2032, avant la mise en service de la dernière section, les lignes nouvelles auront déjà émis (travaux et exploitation compris) de l'ordre de 2,6 MteCO₂. Le bénéfice en terme de report modal cumulé depuis 2024 sera de près de 2 MteCO₂, et chaque année un gain complémentaire de 400 000 tecO₂ viendra amortir la dernière tranche de travaux, en moins de 4 ans.

En tenant compte de la réalisation complète des lignes nouvelles jusqu'à l'Espagne, le bilan carbone « travaux + exploitation + report modal » devient positif en 2036.

Au bout de 30 ans (fin 2053) on obtient un bilan positif de 8,3 MteCO₂ pour les lignes nouvelles du GPSO.

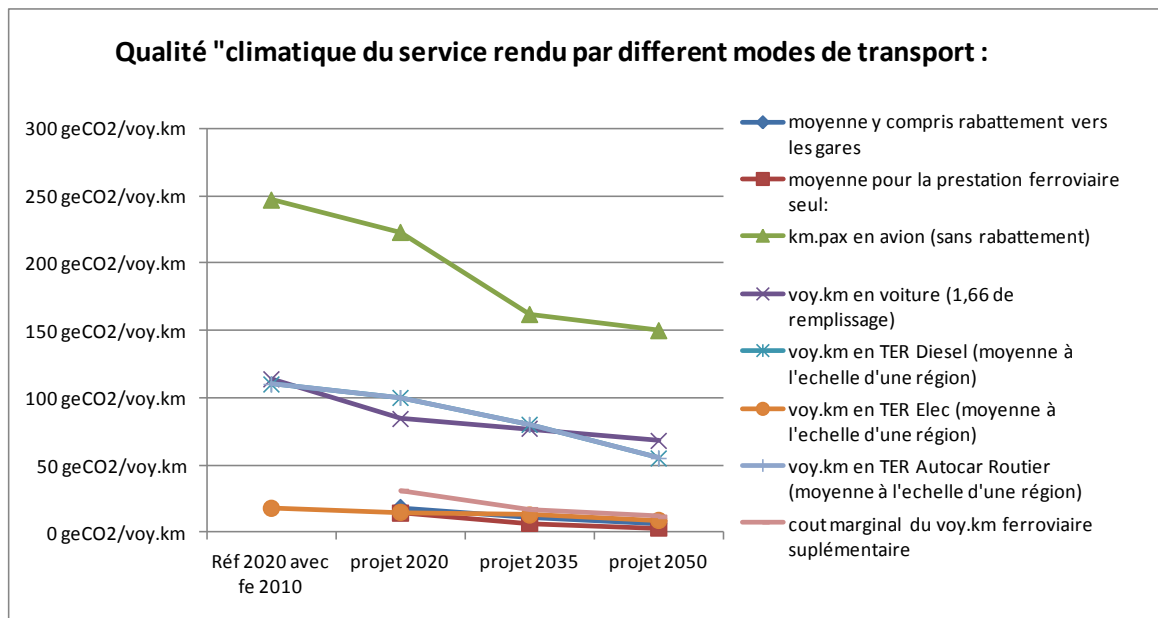


Graphique de surplus sur 30 ans de vie du projet GPSO complet – en MTeCO₂

Pour les lignes nouvelles de la phase 1 (Bordeaux-Toulouse/Bordeaux-Dax), le bilan carbone devient positif en 2034. Au bout de 30 ans (fin 2053) on obtient un bilan positif de 5,2 MteCO₂.

¹¹ Compatible 2050 signifie une mobilité dont le contenu CO₂ est inférieur à 37 gCO₂/voy.km – voir note suivante.

Autre indicateur, l'empreinte carbone par voy.km. Cette infrastructure fournira un service de mobilité durable au sens de son impact climatique. En effet dans une hypothèse antérieure moins favorable, dès 2020, son contenu carbone était inférieur à ce que devrait fournir la moyenne¹² des modes de transport en 2050. Il sera 3 fois plus performant en 2050.



¹² La mobilité durable en 2050 correspond à 12 000 km par an et par personne (20% de moins qu'aujourd'hui), mais produits en n'utilisant que 450 kg de CO₂ (sur un budget individuel de 1415 kg – issu du facteur 4 – 100 millions de Tonnes de CO₂ par an pour la France, pour 70 millions de français). Cela se traduit par un seuil de durabilité pour la mobilité des personnes de 37 gCO₂/voy.km