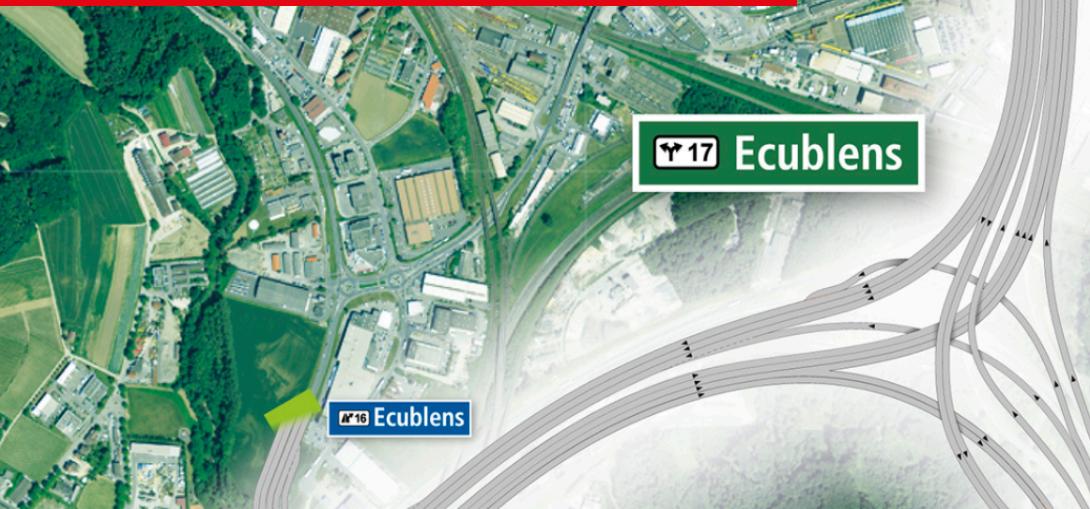


Développement d'un calculateur d'émissions de CO₂ dans un contexte de chantier autoroutier

Gabriel Kathari

Paul Seguin



17 Ecublens

18 Lausanne – Crissier

Mai 2020

Responsable EPFL : Prof. Eugen Brühwiler

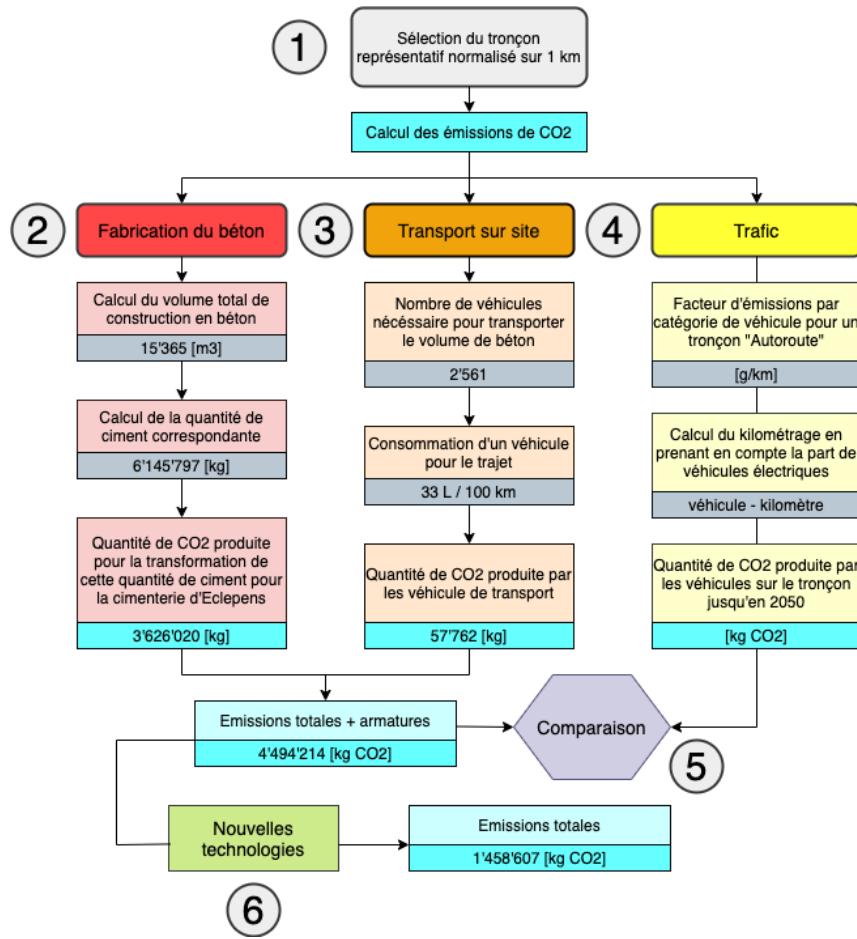
Responsable Entreprise : Nicolas Fawer



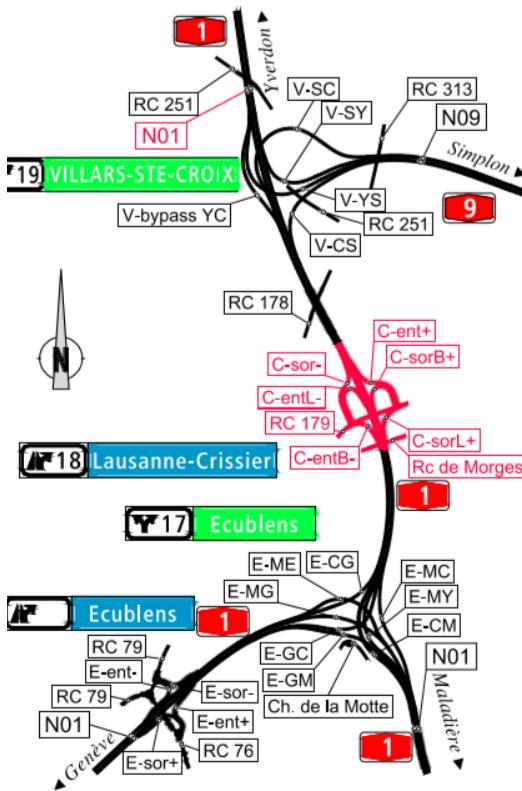
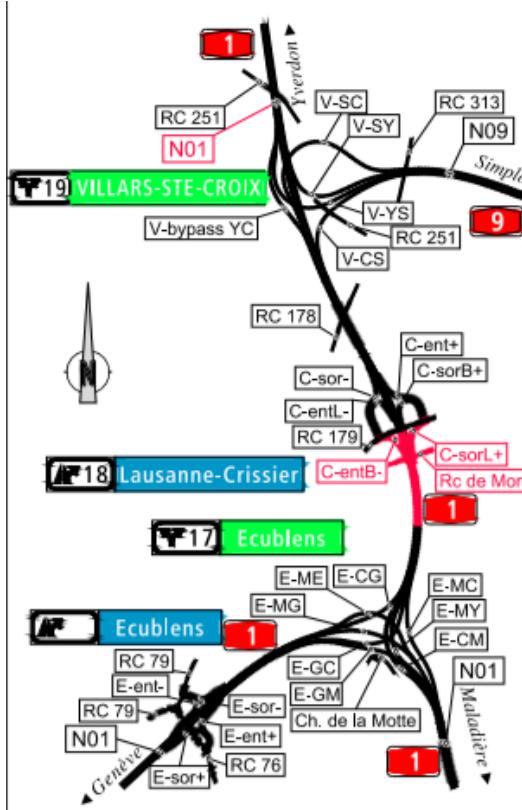
Plan de la présentation

- Émissions liées à la production de béton
- Émissions liées au transport du béton
- Émissions liées à la mise en œuvre
- Émissions liées au trafic
- Résultat final et discussions
- Redevance RPLP pour poids lourds bonus
- Conclusion
- Limites du projet
- Remerciements

Schéma global des différentes étapes



Rappel du tronçon représentatif



- Tronçon 07 Maladière Villars-Ste_Croix
- Section 1 : Km 66.000 à Km 66.600 (portion d'autoroute)
- Section 2 : Km 66.600 à Km 67.000 (jonction d'autoroute)



Émissions liées à la production de béton

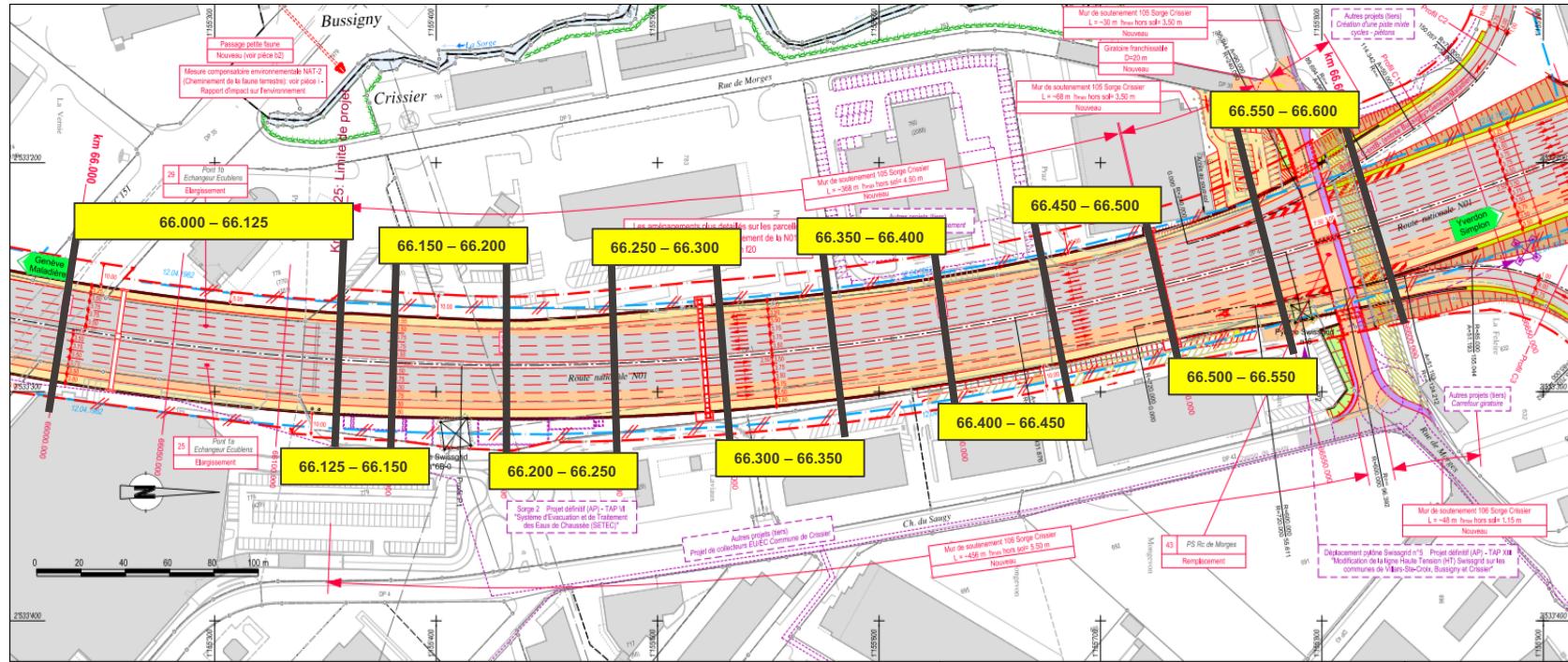
Démarche - section 1

Démarche - section 2

Résultat

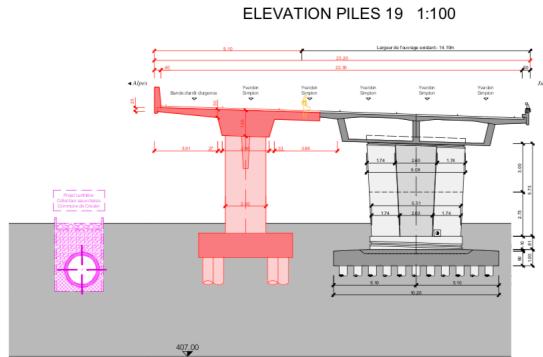
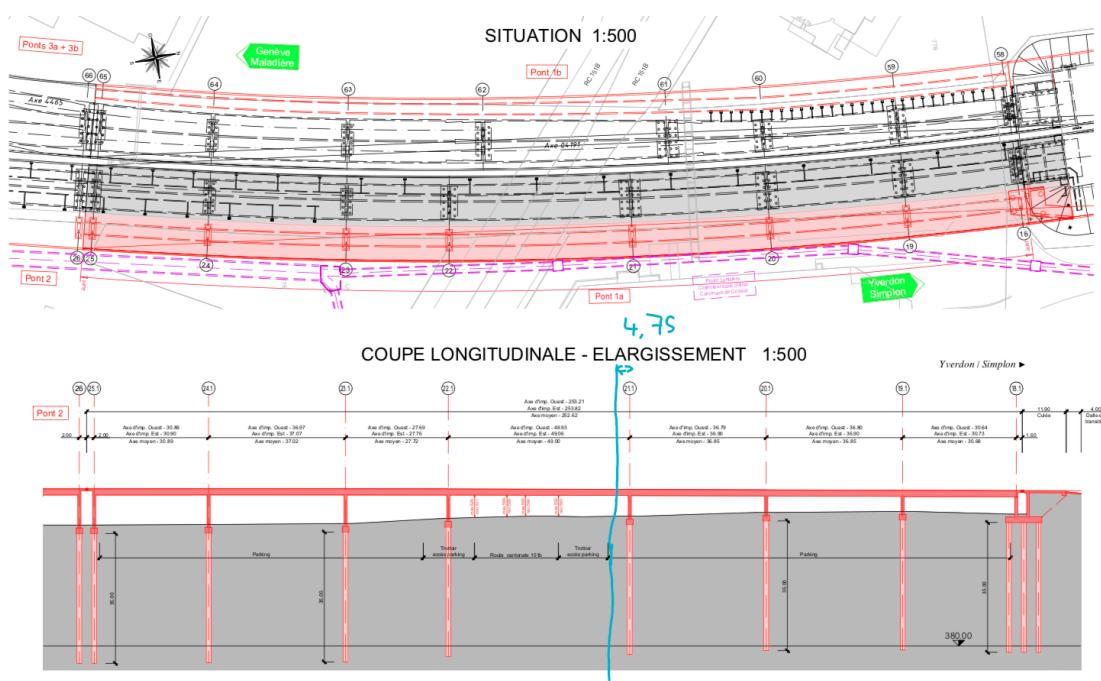
Démarche - section 1

Subdivision en 11 secteurs



Démarche - section 1

Secteur 66.000 – 66.125 → Viaduc



Démarche - section 1

Secteur 66.000 – 66.125 → Viaduc

Point 1b: Km 66.000 --> Km 66.125	File51:	File50:	File59:	File58_1:	File58_2:	File58_3:
Poutre: Largur: 2,5 Epaisseur: 0,8 Hauteur: 4,92 Volume: 9,84	Poutre: Largur: 2,5 Epaisseur: 0,8 Hauteur: 4,92 Volume: 9,84	Poutre: Largur: 2,5 Epaisseur: 0,8 Hauteur: 4,92 Volume: 9,84	Poutre: Largur: 6,5 Epaisseur: 0,8 Hauteur: 4,92 Volume: 23,88	Poutre: Largur: 6,5 Epaisseur: 0,7 Hauteur: 6,02 Volume: 27,73	Poutre: Largur: 2,5 Epaisseur: 0,7 Hauteur: 4,92 Volume: 9,84	Poutre: Largur: 2,5 Epaisseur: 0,8 Hauteur: 4,92 Volume: 9,84
Chaussée1: Largur: 3,1 Epaisseur: 0,9 Hauteur: 1,1 Volume: 2,728	Chaussée1: Largur: 3,1 Epaisseur: 0,9 Hauteur: 1,1 Volume: 2,728	Chaussée1: Largur: 3,1 Epaisseur: 0,9 Hauteur: 1,1 Volume: 2,728	Chaussée1: Largur: 3,1 Epaisseur: 0,9 Hauteur: 1,1 Volume: 2,728	Chaussée1: Largur: 3,1 Epaisseur: 0,9 Hauteur: 1,1 Volume: 2,728	Chaussée1: Largur: 3,1 Epaisseur: 0,9 Hauteur: 1,1 Volume: 2,728	Chaussée1: Largur: 3,1 Epaisseur: 0,9 Hauteur: 1,1 Volume: 2,728
Chaussée2: Largur: 6,9 Epaisseur: 0,8 Hauteur: 0,5 Volume: 2,784	Chaussée2: Largur: 8,63 Epaisseur: 0,8 Hauteur: 0,5 Volume: 3,616	Chaussée2: Largur: 8,63 Epaisseur: 0,8 Hauteur: 0,5 Volume: 3,616	Chaussée2: Largur: 7,3 Epaisseur: 0,8 Hauteur: 0,5 Volume: 2,98	Chaussée2: Largur: 7,3 Epaisseur: 0,8 Hauteur: 0,5 Volume: 2,98	Chaussée2: Largur: 7,3 Epaisseur: 0,8 Hauteur: 0,5 Volume: 2,98	Chaussée2: Largur: 8,63 Epaisseur: 0,8 Hauteur: 0,5 Volume: 3,607
Socle: surface 3,30093 Hauteur: 12 Volume: 39,6111	Socle: surface 3,30093 Hauteur: 12 Volume: 39,6111	Socle: surface 3,30093 Hauteur: 12 Volume: 39,6111	Socle_1: surface 2,6608 Hauteur: 12 Volume: 27,1298	Socle_1: surface 2,6608 Hauteur: 12 Volume: 27,1298	Socle_1: surface 2,6608 Hauteur: 12 Volume: 27,1298	Socle: surface 3,30093 Hauteur: 12 Volume: 39,6111
Volumefinal: 54,9631 m3	Volumefinal: 55,9591 m3	Volumefinal: 55,6111 m3	Socle_2: Largur: 7,3 Epaisseur: 4,4 Hauteur: 1,6 Volume: 51,392	Socle_2: Largur: 7,3 Epaisseur: 4,4 Hauteur: 1,6 Volume: 51,392	Socle_2: Largur: 7,3 Epaisseur: 4,4 Hauteur: 1,6 Volume: 51,392	Volumefinal: 55,6111 m3
			Volumefinal: 109,754 m3	Volumefinal: 131,417 m3		

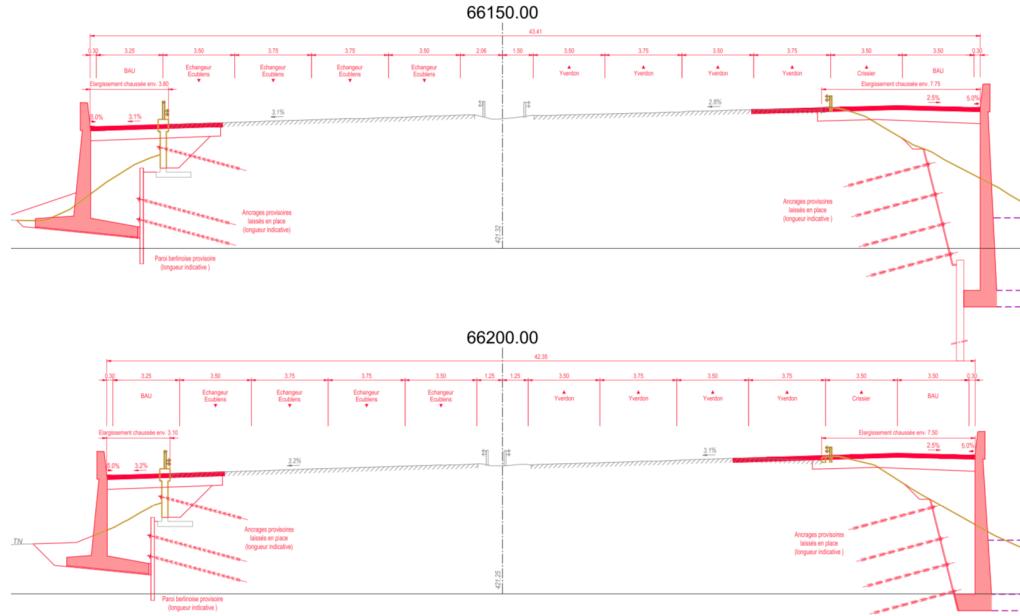
Somme des ponts:	462,991 m³	Chaussée_1 Largeur moyenne: 7,785	Chaussée_2 : Largeur: 3,1
		Hauteur: 0,5	hauteur: 1,6
		longeur: 121,8	longeur: 121,8
		Volumen: 44,207	Volumen: 604,178

Parties:	Somme des points:	568.316 m³	Chaussée_1	Largur moyenne:	10.68	Chaussée_2	Largur:	3.1
				Hauteur:	0.5		Hauteur:	1.6
				Longeur:	122.85		Longeur:	122.65
				Volume:	658.051		Volume:	608.144
	Volumet total parties:	1831.63						
TOTAL PARTIES:	VOLUME:	3372.06 m³						

Démarche - section 1

Autres secteurs

- Utilisation des plans de profil le long des secteurs et calcul des dimensions moyennes des ouvrages entre deux plans de profil pour la longueur de chaque secteur.



Démarche - section 1

Autres secteurs

Chaussée Ouest :	chaussée :	Largeur	6,5
		Hauteur	0,3
		Longeur	25
		Volume	48,75
	Structure	Volume	148,4375
Chaussée EST :	Chaussée	Largeur	9,175
		Hauteur	0,3
		Longeur	25
		Volume	66,8125
	Structure	Volume	165,625
VOLUME TOTAL		431,625 m ³	

66.125 – 66.150

Chaussée Ouest :	chaussée :	Largeur	5,5
		Hauteur	0,3
		Longeur	50
		Volume	82,5
	Structure	Volume	237,5
Chaussée EST :	Chaussée	Largeur	11,5
		Hauteur	0,3
		Longeur	50
		Volume	172,5
	Structure	Volume	268,75
VOLUME TOTAL		761,25 m ³	

66.150 – 66.200

Chaussée Ouest :	chaussée_1	Largeur	7,5
		Hauteur	0,3
		Longeur	50
		Volume	150
	Structure	Volume	250
Chaussée EST :	Chaussée	Largeur	11
		Hauteur	0,3
		Longeur	50
		Volume	165
	Structure	Volume	318,75
VOLUME TOTAL		883,75 m ³	

66.200 – 66.250

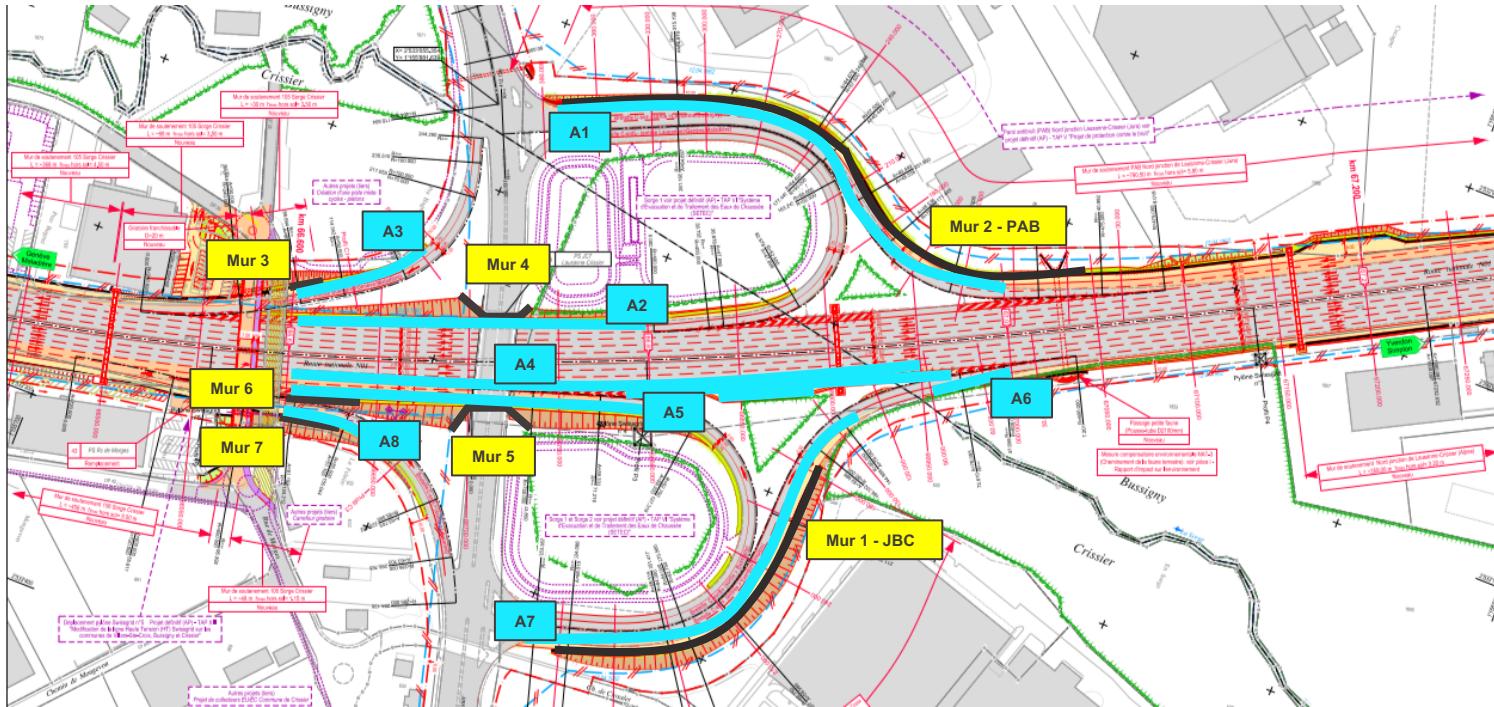
Chaussée Ouest :	chaussée_1	Largeur	5
		Hauteur	0,3
		Longeur	50
		Volume	131,25
	Structure	Volume	212,5
Chaussée EST :	Chaussée_1	Largeur	12,25
		Hauteur	0,3
		Longeur	50
		Volume	266,25
	Structure	Volume	175
VOLUME TOTAL		785 m ³	

66.450 – 66.500

Extrait du calculateur de volume excel en annexe dans le rapport

Démarche - section 2

Subdivision en 8 portions & 7murs de soutènement



Km 66.700 à km 67.600

Démarche – section 2

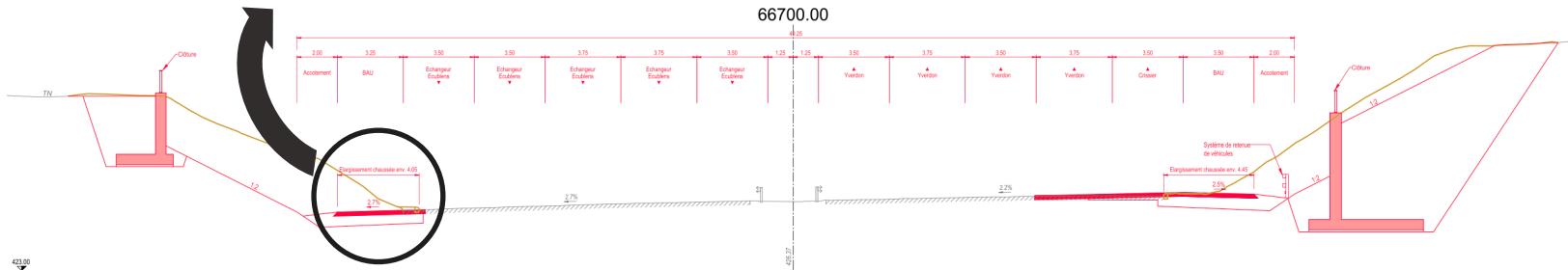
Exemple – Portion A2

- Bande d'arrêt d'urgence
- « Rectangulation » et triangulation

Schéma vue en surface



partie 1 :	Longueur	170,8 m	partie 2 :	Longueur	107,4 m
	Largeur	4 m		Largeur	4 m
	Hauteur	0,3 m		Hauteur	0,3 m
	Volume	204,96 m ³		Volume	64,44 m ³

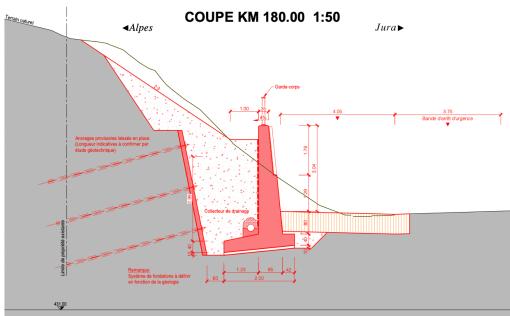


Démarche – section 2

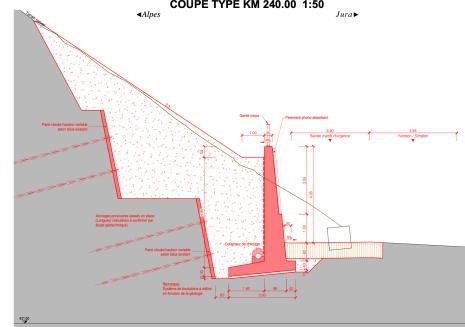
Exemple – Mur de soutènement JBC

- Double « rectangulation » pour le mur et les parois
- Utilisation des côtes

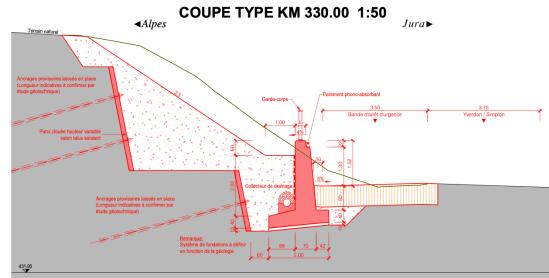
Km 180 à 240	Volume mur [m ³]	186,816
	Volume paroi [m ³]	51,82



Km 240 à 330	Volume mur [m ³]	426,096
	Volume paroi 1 [m ³]	90,27
	Volume paroi 2 [m ³]	90,27



Km 330 à 360	Volume mur [m ³]	74,81
	Volume paroi 1 [m ³]	10,608
	Volume paroi 2 [m ³]	17,85



Résultat

Volume final : 15'365 m³ de construction

- 400 kg de ciment par m³ pour un béton d'ouvrage d'art.
- Donc **6'145'797** kg de ciment.
- Selon Holcim : 590 kg de CO₂ relâché pour 1 tonne de ciment

Emission totale de la production de béton : 3'626'020 kg CO₂





Émissions liées au transport du ciment

Démarche et résultat

Distance chantier-cimenterie : un paramètre important

Emissions liées au transport du ciment

Depuis la cimenterie d'Eclépens :

- Camions malaxeurs de 6m³ - 4 ou 5 essieux.
- 28.60 km aller – retour
- 22,56 kg de CO₂ émis pour un aller-retour
- 2561 aller-retours nécessaires pour transporter tout le volume de ciment



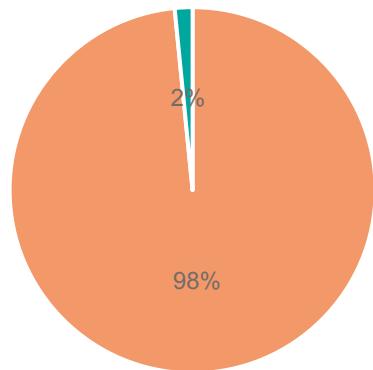
57'763 kg CO₂ pour le transport depuis Eclépens.

Emissions liées au transport du ciment

Comparaison avec la cimenterie de Untervaz:

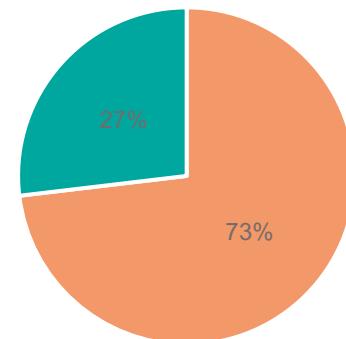
- Eclepens : 26,8 km aller – retour
- Untervaz : 660 km aller - retour

Avec le scénario de la cimenterie d'Eclepens



- Part des émissions induites par la production du béton
- Part des émissions de CO₂ inuite par le transport du béton sur site

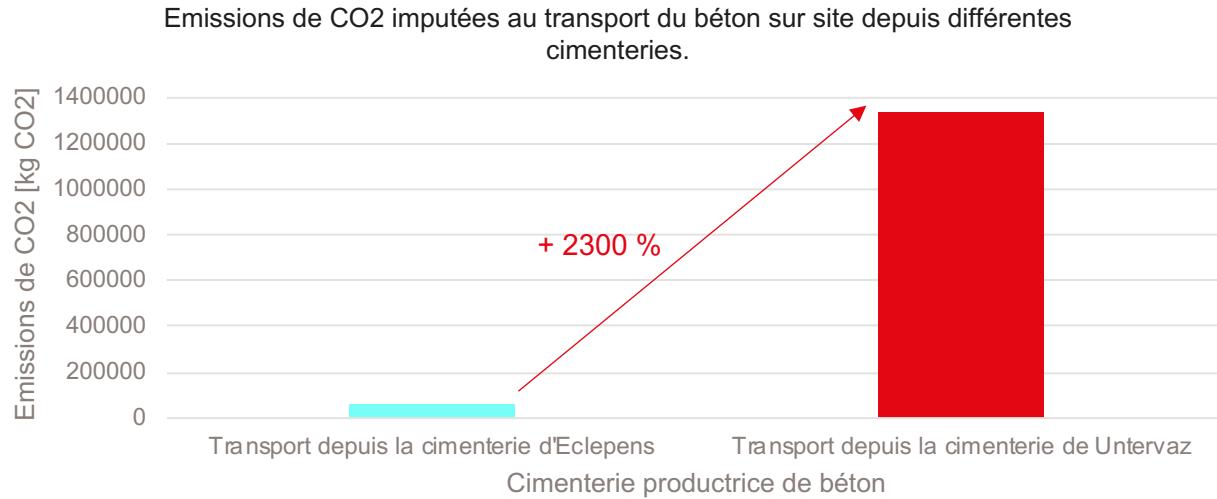
Avec le scénario de la cimenterie de Untervaz



- Part des émissions induites par la production du béton
- Part des émissions de CO₂ inuite par le transport du béton sur site

Emissions liées au transport du ciment

La distance cimenterie – chantier , un facteur décisif pour les émissions de CO₂ liées à la construction



Relation linéaire → Chaque km de trajet augmente de 0,04 % la part des émissions de CO₂ du transport par rapport à la production du ciment.



Émissions liées à la mise en œuvre

Source :

1. Conference GC'2009 – CO2CRETE Impact
L'empreinte CO2 du béton – Lionel Linger, Laurent Boutillon, Géraldine Thomas – Mars 2009

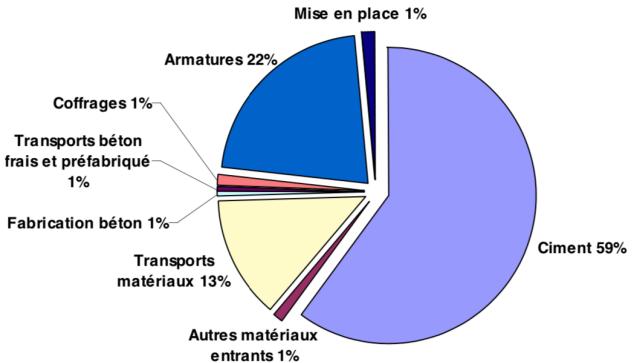
Emissions liées à la mise en œuvre

Emissions liées à l'armature :

- Moyenne d'environ 20% des émissions globales (production du béton + transport sur site).
- Peut grandement varier en fonction du type d'ouvrage mais représentatif pour notre type d'ouvrage.

Emissions liées à la mise en œuvre:

- Coffrage : environ 1% des émissions globales.
- Mise en place : environ 1%.



Répartition type des part d'émission des différents secteurs de la construction pour la mise en place de l'autoroute A19 en France. Cf : source 1



Calcul des émissions liée au trafic

Rappels

Quelles démarche suivre?

Méthode 1

Méthode 2

Comparaison

Source : Rapport Technique Suppression du goulet d'étranglement de Crissier

6 catégories de véhicule

voiture particulière (**PW**), véhicules utilitaires légers (**LNF**), véhicules utilitaires lourds (**SNF**), autocars (**RBus**), ~~bus publics~~ (**LBus**), motocyclettes (**MR**)

Types d'émissions du trafique routier

- Émissions des véhicules dont le moteur est à la température de fonctionnement (g/véhicule km)
- Émissions de démarrage à froid (g/km parcouru)
- Émissions d'évaporation : évaporation due à la « respiration du réservoir » (g/véhicule et jour), évaporation après un arrêt à chaud (g/véhicule et jour), pertes en cours de route (g/véhicule-km)

Quelle démarche suivre ?

Annexes utiles (Rapport Luftschadstoffemissionen des Strassenverkehrs des Schweiz 1990-2050)

- Facteur d'émissions par type d'émissions, **par catégorie de route**, par type de carburant, par concept d'émission, par catégories de véhicules [g-polluant/km]

- Émissions par type d'émission (démarrage, à chaud, à froid)
- **Émissions par catégorie de routes (AB, ao, io)**
- Émissions par type de moteur
- Émissions selon le concept d'émission (EURO)

Méthode 1 – Facteur d'émissions par catégories de route

- 1) Connaître le nombre de g-CO₂ par km pour chaque catégories de véhicules

Catégorie de route sélectionnée : Autoroute

Année	Facteurs d'émissions de CO ₂ sur autoroute par type de véhicule [g-CO ₂ /km]				
	PW	LNF	SNF	RBus	MR
2030	144	189	636	734	119
2035	126	169	598	734	118
2040	109	153	564	733	118
2045	97	141	541	733	118
2050	87	130	523	734	118

Méthode 1 – Facteur d'émissions par catégories de route

2) Calculer la proportion de chaque catégories de véhicules

A2 – Kenngrößen zur Verkehrsentwicklung

Tabelle 11: Fahrleistungen 1990-2050 in Mio. Fzkm/Jahr

Jahr	Personenwagen	Leichte Nutzfahrzeuge	Schwere Nutzfahrzeuge	Reisebusse	Linienbusse	Motorräder
1990	42'649	2'600	1'992	108	174	2'025
1995	41'324	2'746	2'107	110	192	1'563
2000	45'613	2'957	2'273	99	200	1'700
2005	48'040	3'228	2'120	106	229	1'785
2010	50'949	3'502	2'226	118	244	1'852
2015	55'114	4'129	2'235	131	272	2'027
2020	56'618	4'359	2'357	135	305	2'082
2025	58'628	4'652	2'458	139	322	2'156
2030	60'471	4'945	2'559	144	340	2'224
2035	62'032	5'229	2'665	147	354	2'281
2040	62'810	5'514	2'772	149	365	2'310
2045	63'340	5'738	2'856	151	371	2'329
2050	63'724	5'941	2'934	151	376	2'344

Zur Definition der Fahrzeugkategorien, siehe Tabelle 2 in Kap. 2.1

Tabelle INFRAS. Quelle: BFS, ARE 2016a, ARE 2016b, eigene Berechnungen



Part de chaque type de véhicule (coefficient)					
Année	PW	LNF	SNF	RBus	MR
2030	0,8597	0,0703	0,0364	0,002	0,0316
2035	0,8573	0,0723	0,0368	0,0021	0,0315
2040	0,8539	0,075	0,0377	0,002	0,0314
2045	0,8512	0,0771	0,0384	0,002	0,0313
2050	0,8486	0,0791	0,0391	0,002	0,0312

Méthode 1 – Facteur d'émissions par catégories de route

3) Retirer la part des véhicules électriques

Année	PW	LNF	SNF	RBus	MR
2030	0,09	0,02	0,02	0	0,03
2035	0,16	0,03	0,02	0	0,03
2040	0,24	0,06	0,03	0	0,04
2045	0,33	0,1	0,05	0	0,04
2050	0,41	0,14	0,06	0	0,05



A3 – Fahrleistungsgewichtete Emissionszusammensetzungen

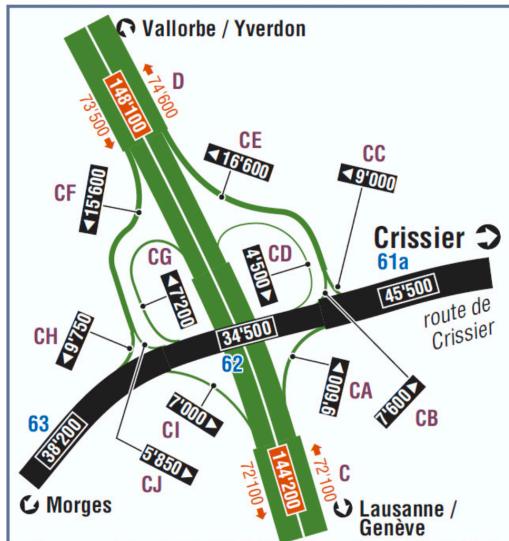
Tabelle 13: Fahrleistungsgewichtete Verkehrs zusammensetzung nach Emissionsstufen

Fz-kat	Technologie/ Emissionsstufe	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2025	2040	2045	2050
PW	PW B Euro-0	94%	52%	20%	5%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
PW	PW B Euro-1	41%	36%	18%	6%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
PW	PW B Euro-2	35%	28%	15%	5%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
PW	PW B Euro-3	1%	18%	13%	6%	2%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
PW	PW B Euro-4	0%	14%	33%	22%	12%	5%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
PW	PW B Euro-5				3%	22%	16%	10%	4%	1%	0%	0%	0%	0%
PW	PW B Euro-6					3%	19%	31%	37%	37%	34%	30%	26%	
PW	PW D Euro-0	5%	3%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
PW	PW D Euro-1	1%	4%	3%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
PW	PW D Euro-2	0%	4%	3%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
PW	PW D Euro-3	0%	10%	7%	3%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
PW	PW D Euro-4	3%	18%	12%	7%	3%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
PW	PW D Euro-5				3%	22%	16%	10%	4%	1%	0%	0%	0%	0%
PW	PW D Euro-6					3%	17%	12%	8%	3%	1%	0%	0%	0%
PW	PW D Euro-6d						5%	23%	34%	40%	38%	34%	30%	
PW	Alternative						0%	0%	0%	1%	1%	2%	2%	3%
PW	PW elektrisch						0%	1%	4%	9%	16%	24%	33%	41%
LNF	LNF B Euro-0	70%	38%	13%	4%	1%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
LNF	LNF B Euro-1	2%	27%	29%	13%	4%	1%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
LNF	LNF B Euro-2				10%	11%	5%	2%	1%	1%	0%	0%	0%	0%
LNF	LNF B Euro-3				0%	6%	5%	2%	1%	1%	0%	0%	0%	0%
LNF	LNF B Euro-4				1%	6%	4%	3%	1%	1%	0%	0%	0%	0%
LNF	LNF B Euro-5					0%	3%	3%	2%	1%	0%	0%	0%	0%
LNF	LNF B Euro-6						0%	3%	4%	5%	5%	5%	5%	5%
LNF	LNF D Euro-0	28%	30%	14%	5%	2%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
LNF	LNF D Euro-1	5%	16%	7%	3%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
LNF	LNF D Euro-2	18%	20%	9%	3%	2%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
LNF	LNF D Euro-3	0%	33%	28%	11%	6%	4%	1%	1%	0%	0%	0%	0%	0%
LNF	LNF D Euro-4				35%	30%	18%	10%	6%	2%	1%	0%	0%	0%
LNF	LNF D Euro-5				1%	35%	31%	19%	10%	6%	2%	1%	0%	0%
LNF	LNF D Euro-6					5%	31%	56%	72%	80%	83%	82%	79%	
LNF	LNF Alternative						1%	0%	0%	1%	1%	1%	2%	2%
LNF	LNF elektrisch						0%	0%	1%	2%	3%	6%	10%	14%

Méthode 1 – Facteur d'émissions par catégories de route

4) Le kilométrage

Déterminer le nombre total de véhicule sur notre tronçon à l'année



- Moyenne entre jonction et portion (valeurs journalières)
- Augmentation du trafic +1%/an $\rightarrow C(t) = C_0 * (1+%)^t$

Évolution du trafic total entre 2030 et 2050 (+1%/an)					
Année	2030	2035	2040	2045	2050
Nbr véhicule	53381288	56104270	58966151	61974017	65135315

Méthode 1 – Facteur d'émissions par catégories de route

4) Le kilométrage

- Calculer la part de chaque catégorie de véhicule
- Retirer la part des véhicules électriques

5) Résultat final

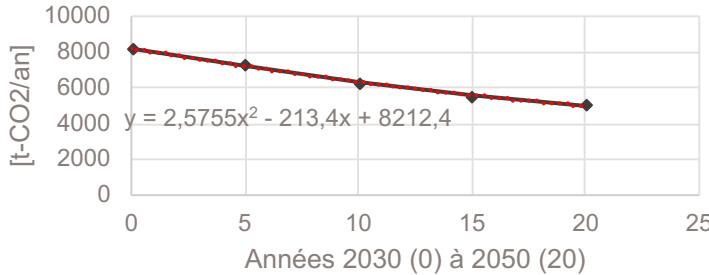
Émissions par type de véhicule entre 2030 et 2050 sans la part électrique [kg-CO2/année]					
Année	PW	LNF	SNF	RBus	MR
2030	6013673,641	695075,9296	1211082,195	78363,73005	194712,9437
2035	5090712,469	664955,6024	1209959,94	86479,12124	202283,3832
2040	4171093,123	636038,3905	1216171,916	86444,37774	209742,1283
2045	3428370,922	606353,1683	1223099,379	90853,90978	219739,0431
2050	2837205,621	576016,3449	1252053,307	95618,6429	227812,0681

Méthode 1 – Facteur d'émissions par catégories de route

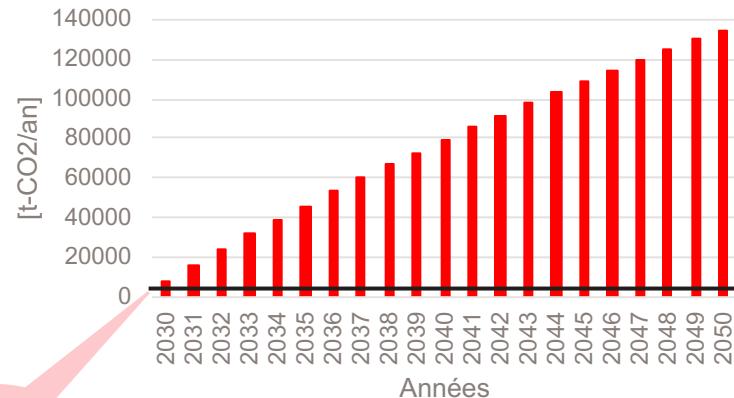
5) Résultat final

Approximation chronologique des émissions du trafic sur notre tronçon

Évolution des émissions de CO₂ au fil des années



Évolution cumulative des émissions au fil des années



Méthode 2 – Émissions par catégories de route

- Valeur en tonne-CO2/an émis par tout le réseau autoroutier Suisse

Émissions en tCO2/an pour catégorie Autoroute						
Année	PW	LNF	SNF	RBus	MR	Total
2030	3'455'434	483'913	1'005'801	59'725	78'892	5'083'765
2035	3'065'772	458'805	983'365	61'177	79'953	4'649'073
2040	2'691'333	437'885	964'635	61'775	80'422	4'236'049
2045	2'413'359	419'048	953'205	62'335	81'050	3'928'998
2050	2'182'598	402'188	945'618	62'768	81'670	3'674'842



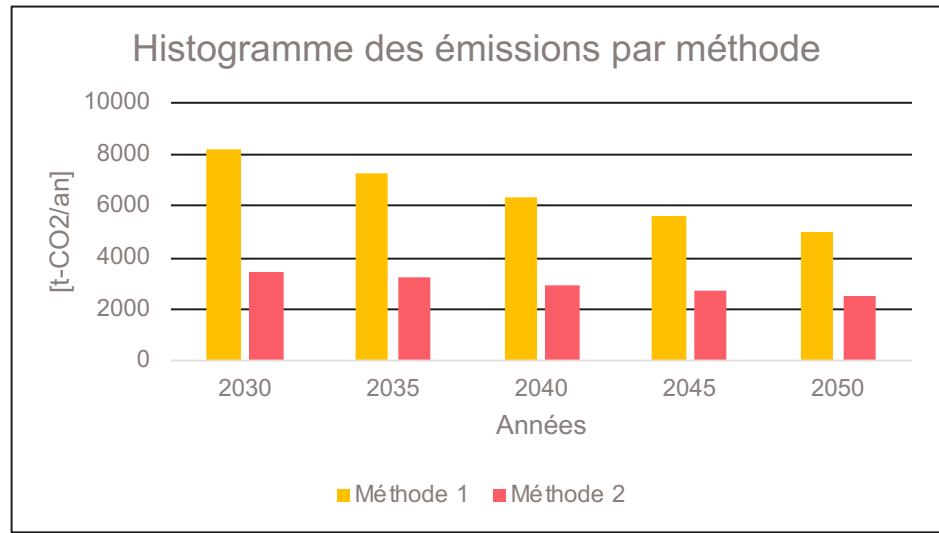
Route			
Longueur des routes nationales	1 859 km	2018	
dont autoroutes	1 462 km	2018	
Longueur des routes cantonales	17 816 km	2018	
Longueur des routes communales ²	51 880 km	2018 ²	

- Connaître le nombre total de km d'autoroute

Émissions en tCO2/km-an pour catégorie Autoroute						
Année	PW	LNF	SNF	RBus	MR	Total
2030	2'364	331	688	41	54	3'477
2035	2'097	314	673	42	55	3'180
2040	1'841	300	660	42	55	2'897
2045	1'651	287	652	43	55	2'687
2050	1'493	275	647	43	56	2'514

Comparaison des deux méthodes

- Fort trafic au niveau du tronçon par rapport à la moyenne



Méthode 1 - Facteur d'émissions par catégories de route	
Avantages	Inconvénients
Plus précis pour le type de route et la catégorie de véhicule	Contient le démarrage à froid et l'évaporation Type de véhicule pas pris en compte (euro 1,2,3,4,5,6) ni le type de moteur Difficulté à évaluer le kilométrage

Méthode 2 – Émissions totales par catégories de route	
Avantages	Inconvénients
Facilement réalisable	Contient le démarrage à froid et l'évaporation Type de véhicule pas pris en compte (euro 1,2,3,4,5,6) ni le type de moteur Moyenne pour tout le réseau autoroutier → moins précis



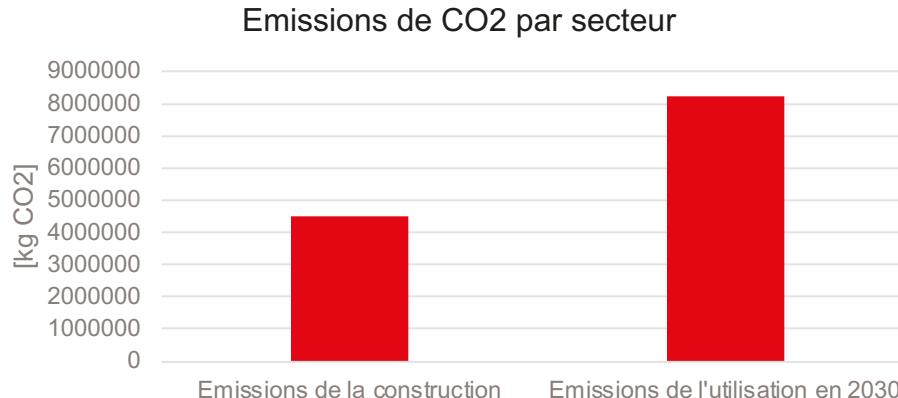
Résultat final de toutes les émissions

Résultat

- Emissions liées à la production du béton : 3'626'020 kg CO₂
 - Emissions liées au transport sur site : 57'762 kg CO₂ *
 - Emissions liées à l'armature : 810'432 kg CO₂
-

Total : 4'494'214 kg CO₂

- Emissions liées à l'utilisation du segment en 2030 : 8'192'905 kg CO₂



* Depuis la cimenterie d'Eclépens



Implémentation de nouvelles technologies

Sources :

1. Sustainable Built Environment (SBE) regional conference - ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF RADICAL INNOVATION IN CONCRETE STRUCTURES - S.Zingg, G.Habert, P.Lura, A.Hajiesmaeili – June 2016
2. MDPI - Life Cycle Analysis of Strengthening Existing RC Structures with R-PE-UHPC – A.Hajiesmaeili, F.Pittau, E.Denarié, G.Habert – November 2019

Implémentation de nouvelles technologies

Diminution globale des émissions de CO₂ grâce à l'utilisation d'un nouveau type de béton : **R-PE-UHPFRC ***



- Diminution du volume construit pouvant atteindre un facteur 4.

	Conventional reinforced concrete ^a	HPC-steel ^b	HPC-CFRP ^c
Tensile load, kN	270	270	270
Concrete strength, MPa	30	90	90
Cross-section, cm ²	900	429 ^d	189
Volume, m ³	0.09	0.043	0.019

* ultra-high performance fibre reinforced concrete with polyethylene fibre

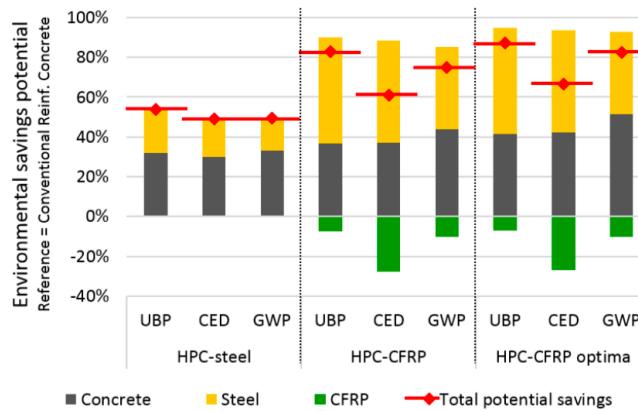
Implémentation de nouvelles technologies

- Augmentation du taux de ciment par m³ de béton (400 → 650).

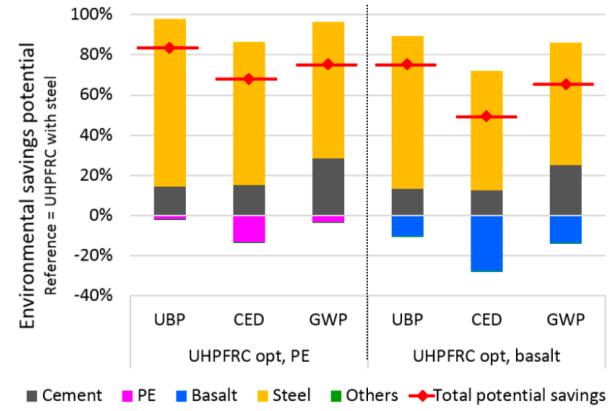
	<i>in kg</i>	Conventional UHPFRC	UHPFRC with PE	UHPFRC with basalt
Cement	650	657	657	

Quantité de ciment en kg par m³ de béton pour différentes technologies cf: source 1

- Diminution moyenne des émissions imputées par l'armature de 80 %.



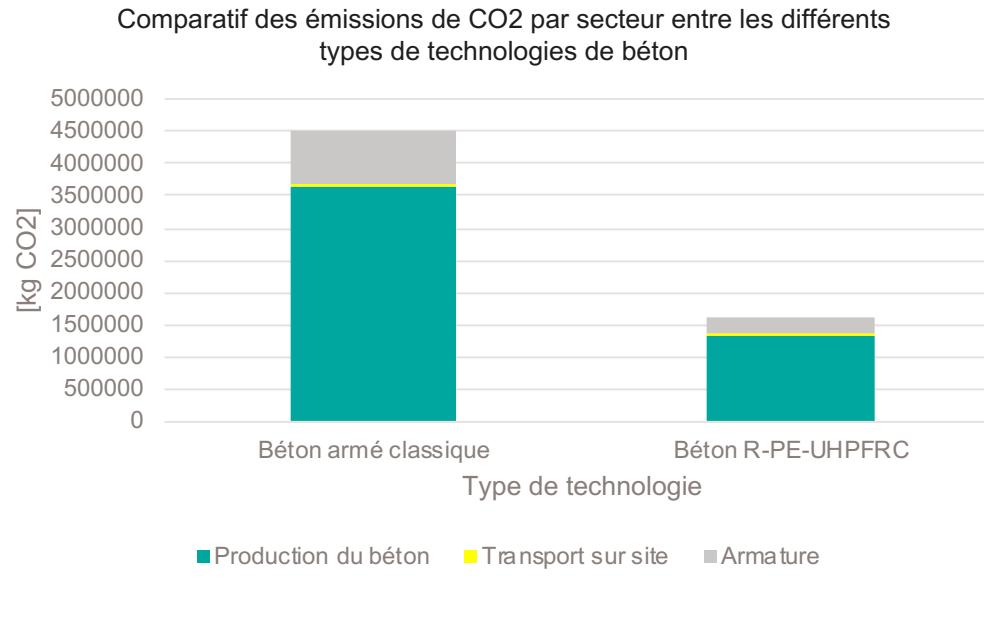
Cf : source 1



Cf : source 1

Implémentation de nouvelles technologies

Comparaison avec l'utilisation de béton armé classique sur le tronçon :



Implémentation de nouvelles technologies

Autre points forts :

- La durabilité de l'ouvrage sur 100 ans est largement augmentée.

→ baisse de 50 % de la rareté «scarcity» écologique basée sur différents éco-facteurs)

→ émissions dues aux maintenances futures fortement diminuées.

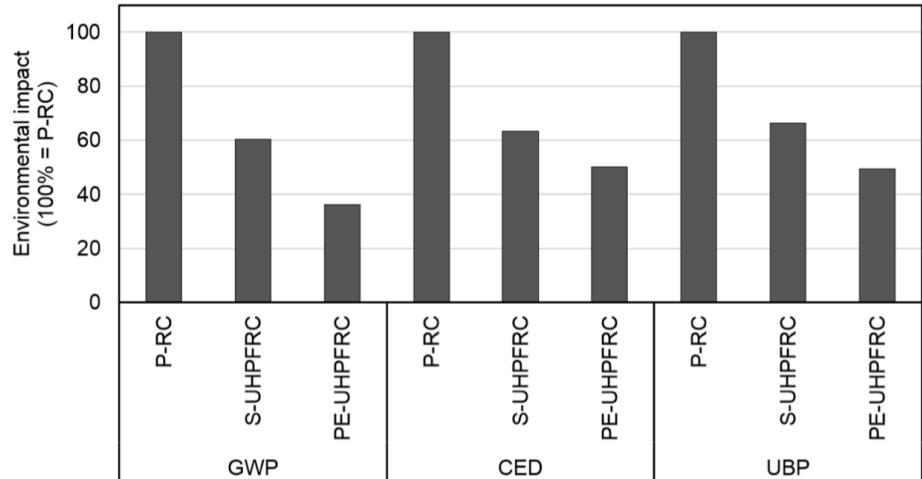


Figure 8. Normalized environmental impact over the life cycle of 100 years.

Résultat global d'une étude de cycle de vie sur 100 ans pour la rénovation du pont de Guillermaux à Payerne en utilisant différentes technologies pour la construction. Cf : source 2



Redevance RPLP pour poids lourds bonus

Redevance sur le trafic des poids lourds liée aux prestations (RPLP)

Calcul et résultat

- Redevance fédérale

Année 2030

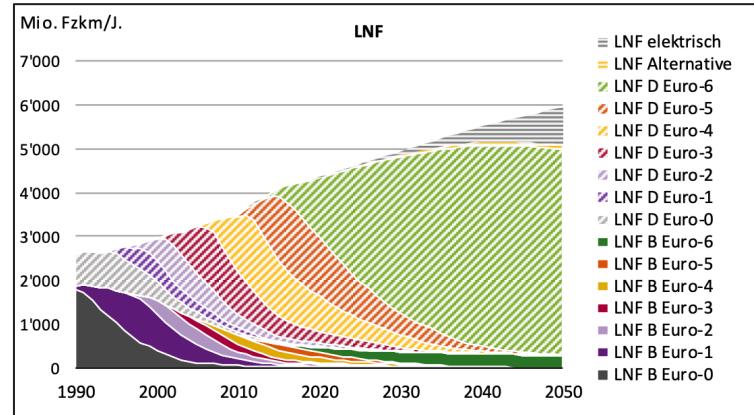
Tronçon de 1km

2 essieux → 18t – part de 33%

3 essieux → 26t – part de 33%

4 essieux → 32t – part de 33%

- Nombre total de poids lourds : 3'677'650



Catégories de redevances	Catégories Euro	Tarif
I	Euro 3, 2, 1 et 0	3.10 ct./tkm
II	Euro 4 et 5 (EEV)	2.69 ct./tkm
III	Euro 6	2.28 ct./tkm

- Total

$$\frac{1}{3} * 3'677'650 * 2.28 * (18 + 26 + 32) = 212'421'064 \text{ ct}$$

→ 2'124'210,64 Mio CHF

Conclusion

- Valeur d'émissions finale du tronçon : 12'687'119 kg CO₂ émis
- Le trafic représente 1,8x plus d'émissions que la construction la première année
- Projet du goulet d'étranglement justifié
- La part des véhicules électriques est primordiale
- Le transport du béton a une part très variable
- 2% des émissions globales de la construction pour la mise en œuvre (coffrage, mis en place)
- Les nouvelles technologies utilise 2,7x moins de béton
- Les nouvelles technologies diminuent de 80% l'impact de l'armature

Limites du projet

- Beaucoup d'approximations pour les quantités de béton et le kilométrage (seulement les plans de mise à l'enquête publique)
- Démarrages à froid et à chaud dans les facteurs d'émissions [g/km]
- Manque de données pour l'armature en CO₂-équivalent
- Manque de données pour la mise en œuvre
- Coronavirus → visite de la cimenterie à Eclepens impossible, internet comme seule source de documentation
- Étude d'impact environnemental pour la suite du projet



- À la section pour l'organisation du Design Project
- À M. Brühwiler et à M. Fawer pour toutes leurs connaissances, données fournies, aides précieuses ainsi que pour leurs disponibilités malgré les circonstances
- Alliance entre génie civile et science de l'environnement très enrichissante

Des questions ?

Remerciements