

23 janvier 2024
BELLEGUIE Antoine

Séminaire SPLOTT

Décarbonation du Rail: Quelles solutions énergétiques pour propulser le ferroviaire vers l'avenir ?

Plan

- Contexte
- Objectif
- Paysage des technologies
- Méthode
- Application
- Résultats
- Discussion
- Prochaines étapes



Le Canada a deux saisons, l'hiver et le mois de juillet - Robert Hollier



Contexte

Contexte environnemental et ferroviaire



- La pollution de l'air provoque **9 millions de décès par an** (Lelieveld and al., 2019)
- Le rail émet **197 millions de tonnes de gaz à effet de serre** chaque année (OurWorldinData, 2018)
- Les transports représentent 24 % des émissions globales de gaz à effet de serre, soit **8 milliards de tonnes** (IEA, 2018)
- La Commission européenne vise une **réduction de -55 % des émissions** liées aux transports d'ici 2050 (EC, 2020)
- Les émissions liées aux transports devraient augmenter de **plus de 60 % d'ici 2050** (UNEP, 2019)
- Objectif de **réduction de 75 % des émissions de CO2** pour le transport ferroviaire de marchandises d'ici 2050 (IEA, 2018)
- Plus de 260 zones à faible émission dans le monde (ICCT, 2021)
- Le rail est l'un des modes de transport les plus efficaces en termes d'énergie (EC, 2021)
- Plus de **500 trains à batterie, 60 trains à hydrogène et 10 trains à biocarburants** en service ou en commande dans le monde (IEA, 2021; M&M, 2021; BloombergNEF, 2021)
- En France, 80% des tonne-kms du fret diesel est effectué sous caténaire (French Gouv., 2018)
- Il y a plus de 120 000 locomotives diesel encore en service (SCI Verkehr, 2023)

Fret Ferroviaire vs Routier



3 fois plus économe en énergie (IEA, 2017)

6 fois moins d'émissions de CO₂ (EEA, 2020)

7 à 8 fois moins de coûts externes (EEA, 2018; UIC, 2021)

40 % moins cher aux États-Unis (OMB, 2019)

Fret Ferroviaire Américain vs Français



Réseau: **226 000km** (World Bank, 2021) **vs 29 273km** (IRJ, 2021)

Longueur: **2,7km** (AAR, 2020) **vs 610m** (UIC, 2020)

Tonnage: **12 500t** (AAR, 2021) **vs 1 100t** (AFRA, 2020)

Marchandises transportées : **35 % : charbon et produits chimiques** (AAR, 2019) contre **45 %: matériaux de construction et produits agricoles** (French Ministry, 2019)

Indicateurs clés



Monde



Etats-Unis



Canada



France

Trafic de Fret Ferroviaire

10.6 Ttkm
(UIC, 2020)

2.7 Ttkm
(AAR, 2020)

456Btkm
(StatCan, 2020)

34.8Btkm
(MTE, 2019)

Part de Marché

7.8%
(UIC, 2020)

40%
(AAR, 2020)

34%
(StatCan, 2019)

10%
(ONPDD, 2021)

Locomotives diesel

Fret et passagers

100,000
(UNIFE, 2022)

20,000
(AAR, 2021)

12,000
(RAC, 2022)

1,400
(SNCF, 2021)

Réseau non-électrifié

71.2%
(SCI Verkehr, 2021)

97%
(FRA, 2021)

95%
(CTA, 2019)

43%
(SNCF, 2021)

Coût de l'électrification

\$0.5 to \$3.5M/km
(IEA, 2020)

\$3.5 to \$9.3M/km
(FTA, 2018)

\$2.5 to \$6M/km
(NEB, 2016)

\$0.35 to \$1.5M/km
(French Gouv., 2018)

Emissions

GES

476MtCO_{2e}
(IEA, 2019)

18MtCO_{2e}
(IEA, 2018)

9.9MtCO_{2e}
(TC, 2020)

2.5MtCO_{2e}
(MTE, 2019)

Mort causée par la pollution de l'air

Pollution interne et externe

9M
(Lelieveld et al., 2019)

107k
(SOGA, 2019)

15.3k
(CMA, 2019)

67k
(SPF, 2016)



Objectif

Objectif

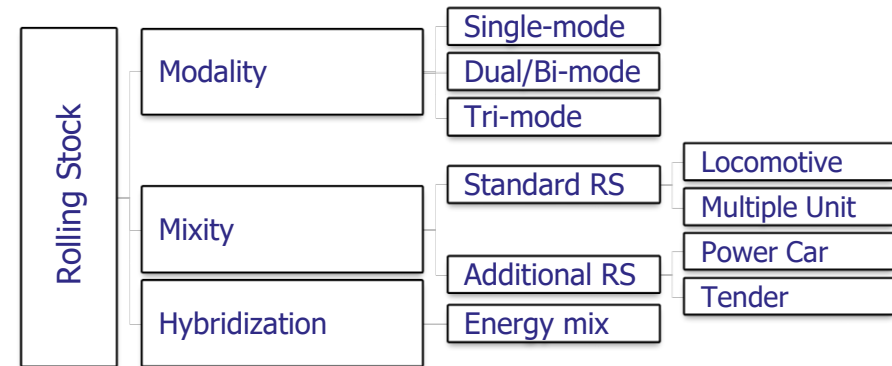
Bien que certaines énergies semblent être privilégiées aujourd'hui;

Le futur marché ferroviaire décarboné se caractérisera par l'**hétérogénéité des alternatives vertes** liées à la grande **variété d'applications et de cas d'utilisation.**

Il existe de nombreuses options: Caténaire, H₂ FC, H₂ ICE, batteries, HVO, GNC/GNL, etc.

Quelle solution répond aux besoins d'un cas d'utilisation spécifique ?

- ↳ Analyse de la faisabilité technique
- ↳ Analyse de l'impact environnemental
- ↳ Analyse de l'efficacité économique



Périmètre de la recherche : la France, l'Allemagne, les États-Unis, le Canada et l'Australie.



Paysage des technologies de propulsion

Paysage des technologies de propulsion

Le défi pour les opérateurs est de **choisir la bonne alternative**

Décarbonation complète

Simple-mode

Simple-mode électrique

Simple-mode batterie

Simple-mode hydrogène

Bi-mode

Bi-mode électrique/batterie

Bi-mode électrique/hydrogène

Bi-mode hydrogène/batterie

Tri-mode

Tri-mode électrique/batterie/hydrogène

Décarbonation partielle

Simple-mode

Simple-mode Biofuels

Simple-mode GNR/GNC/GNL

Bi-mode

Bi-mode électrique/diesel

Bi-mode électrique/biofuel

Bi-mode batterie/diesel

Bi-mode diesel/GNR/GNC/GNL

Tri-mode

Tri-mode électrique/batterie/diesel

Tri-mode hydrogène/diesel/biogaz



Diesel



Electrique



Hydrogène



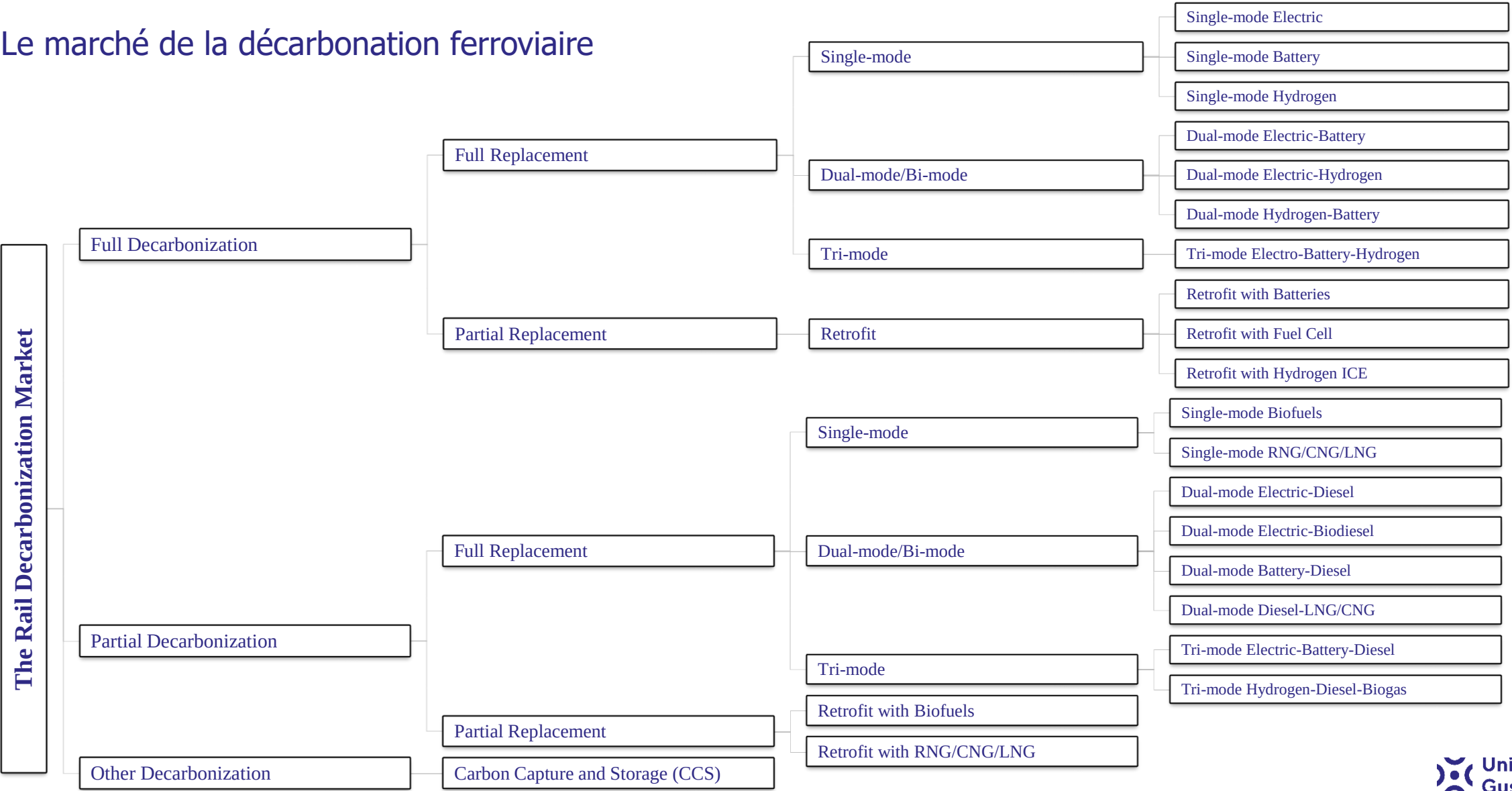
Batterie



Biofuels

Paysage des technologies de propulsion

Le marché de la décarbonation ferroviaire



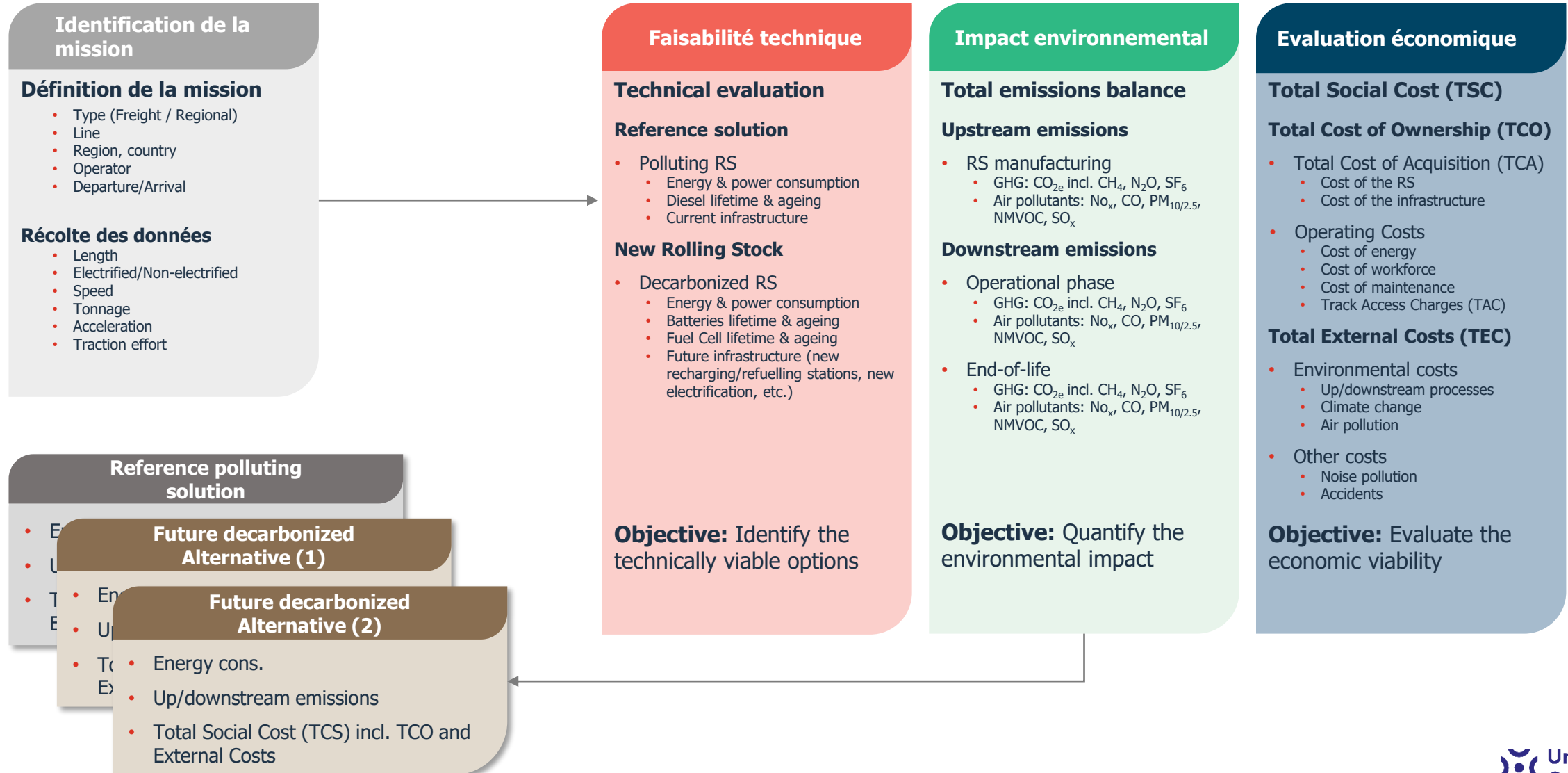
Paysage des technologies de propulsion

	Diesel	Hydrogène	Batterie	Biofuel
				
TCAC attendu 2020 - 2027	-2.5% (M&M, 2021)	+41.3% (AMR, 2021)	+26.6% (AMR, 2021)	+4.5% (AMR, 2021)
Investissement initial	2.5-3.5 million USD	6-10 million USD	4-7 million USD	2.5-3.5 million USD
Coûts de cycle de vie	21 US¢/tkm (UIC, 2015)	27 US¢/tkm (EC, 2018)	23 US¢/tkm (UIC, 2015)	25 US¢/tkm (UIC, 2015)
Durée de vie	25 to 30 years (AAR, n.d.)	25 years (EC, 2018)	20 years (UIC, 2016)	25 to 30 years (UIC, 2018)
Coût de l'énergie	20-30 US¢/kWh (UIC, 2019)	45-65 US¢/kWh (EC, 2018)	10-20 US¢/kWh (IEA, 2020)	7-12 US¢/km (ADEME, 2017)
Coût de la maintenance	2-3 US¢/kWh (AAR, 2021)	8-12 US¢/kWh (EC, 2018)	0.5-1 US¢/kWh (IEA, 2020)	2-3 US¢/km (UIC, 2014)
Emissions	43gCO₂/tkm (UIC, 2018)	2gCO₂/tkm (UIC, 2018)	5gCO₂/tkm (UIC, 2018)	22gCO₂/tkm (UIC, 2018)
Temps de rechargement	15min (AAR, 2021)	15-30min (Iqbal, A. 2020)	20-30min (IEA, 2020)	est. 15-20min
Autonomie	800-1,200km (UIC, 2014)	600-800km (UIC, 2014)	80-160km (UIC, 2014)	800-1,200km (UIC, 2014)

* Note : Les chiffres mentionnés sur cette diapositive ne représentent pas un cas d'utilisation spécifique mais sont des moyennes observées qui peuvent varier considérablement d'un cas d'utilisation à l'autre.

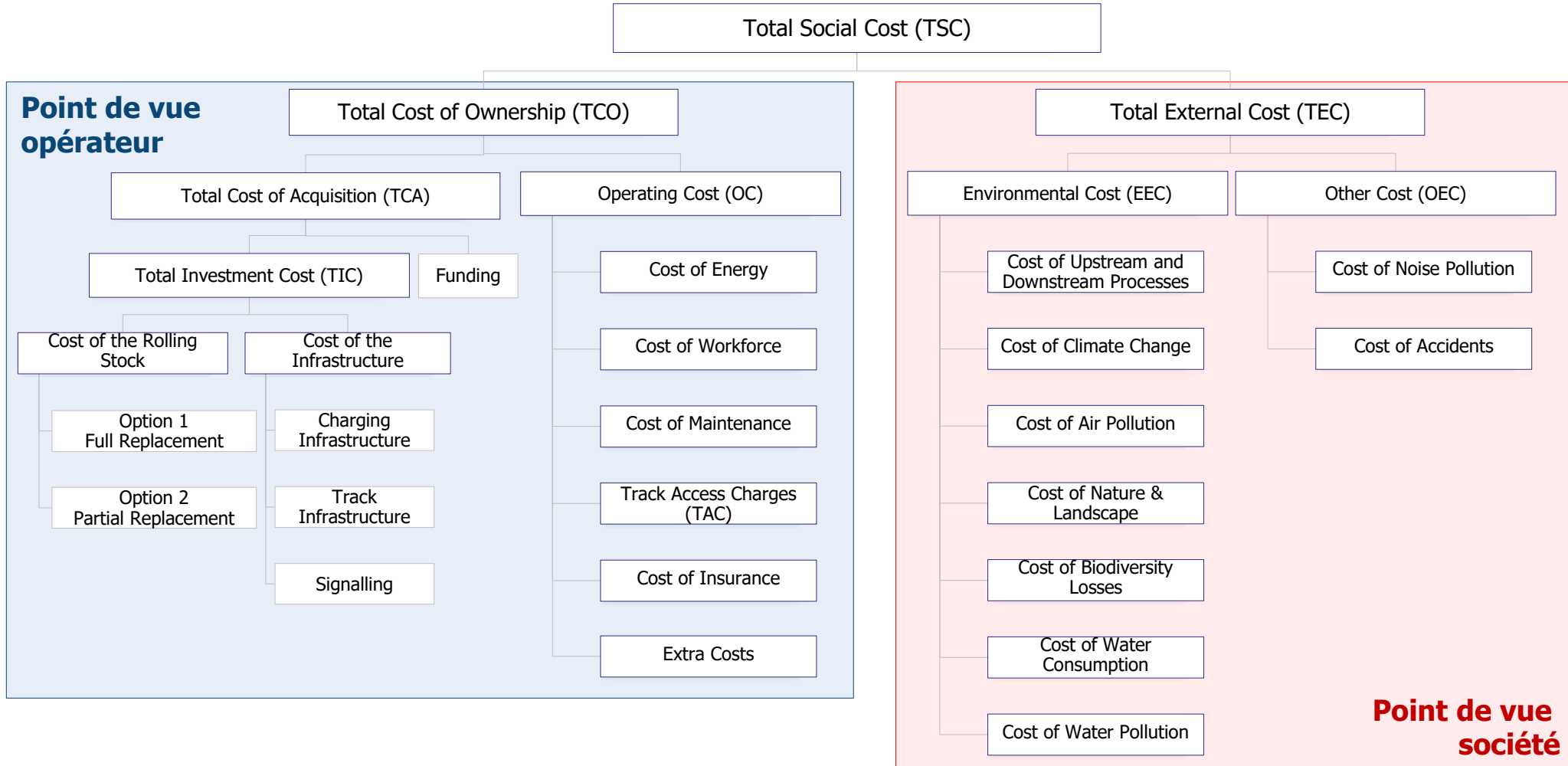
Méthode

Méthode



Méthode

$$TSC_{RS} = TCO_{RS} + TEC_{RS} = \sum \left[(TCA_t + OC_t) \frac{1}{(1+i)^t} \right] + \sum \left[(EEC_t + OEC_T) \frac{1}{(1+i)^t} \right]$$

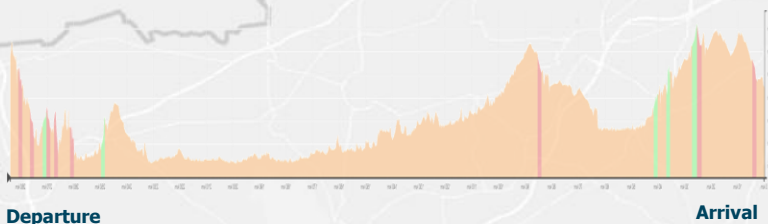




Application sur un cas d'usage

Cas d'étude

Mission		Matériel Roulant		Caractéristiques	
Type	Freight	Locomotive	EURO4000	Distance	
Range	Long range	Type	Single mode	Total	302km
Goods	Aggregates	Wagon	Hopper car	Electrified	220km
Shipper	XXX	Length	418m	Non-Electrified	82km
Country	France			Yearly frequency	260 trains
				Tonnage per train	
				Outbound	1,900t
				Inbound	600t
				Duration	
				Operating	5h10
				Waiting	1h
				Shunting	30min
				Average speed	60km/h



Opérateur X, FR
(Mission de fret)

Plus grande carrière de France

- 82km non-électrifié
- 260 trains par an
- Positionnement stratégique

- 100% trains diesel
- À proximité de zones à faibles émissions (ZFE)
- Flotte d'une trentaine d'années

Cas d'étude

Solution de Référence Simple-mode diesel



Loco diesel + Wagon

1 - Remplacement à l'échelle d'1 unité

Alternative #1 Bi-mode hydrogène/électrique



Loco elec. + Tender H2

Solution de remplacement combinant une locomotive électrique (pour les sections électrifiées) avec un tender hydrogène (pour les sections non-électrifiées)

Alternative #2 Bi-mode batteries/électrique



Loco elec. + Tender Batteries

Solution de remplacement combinant une locomotive électrique (pour les sections électrifiées) avec un tender batteries (pour les sections non-électrifiées)

Alternative #3 Simple-mode biofuel



Loco biofuel

Solution de retrofit consistant à moderniser la locomotive de référence pour utiliser du biofuel

Alternative #4 Simple-mode électrique



Loco elec.

Solution de remplacement consistant en l'électrification de la portion non-électrifiée et la mise en place d'une locomotive électrique

Paramètres d'entrée

Rolling Stock - Reference Solution & Decarbonized Alternatives																																			
Reference solution - Diesel							Alternative #1 - New Elec./H2. Dual-mode RS							Alternative #2 - New Elec./Batt. Dual-mode RS							Alternative #3 - Retrofit Single-mode Biofuel							Alternative #4 - New Single-mode Electric RS							
Characteristics		Set-up			Type		Characteristics		Set-up			Type		Characteristics		Set-up			Type		Characteristics		Set-up			Type		Characteristics		Set-up			Type		
Type	Single-mode	Loco	1	Euro4000	Type	Dual-mode	Loco	1	BB27000	Type	Dual-mode	Loco	1	BB27000	Type	Single-mode	Loco	1	Euro4000	Type	Single-mode	Loco	1	BB27000	Type	Single-mode	Loco	1	BB27000						
Energy	Diesel	Tender	0	N/A	Energy	Elec./H2	Tender	1	H2 tender	Energy	Elec./Bat.	Tender	1	Bt tender	Energy	Biofuel	Tender	0	N/A	Energy	Electric	Tender	0	N/A	Energy	Electric	Tender	0	N/A						
Techno	ICE	Wagons	35	Hopper	Techno	Cat./FC	Wagons	34	Hopper	Techno	Cat./Bat	Wagons	34	Hopper	Techno	ICE	Wagons	35	Hopper	Techno	Catenary	Wagons	35	Hopper	Techno	Catenary	Wagons	35	Hopper						
Tonnage	Loco	Tender	Wagons	Payload	Total		Tonnage	Loco	Tender	Wagons	Payload	Total		Tonnage	Loco	Tender	Wagons	Payload	Total		Tonnage	Loco	Tender	Wagons	Payload	Total		Tonnage	Loco	Tender	Wagons	Payload	Total		
To go	123	N/A	945	850	1918	t	To go	90	60	918	825	1893	t	To go	90	60	918	825	1893	t	To go	123	N/A	945	850	1918	t	To go	90	N/A	945	850	1885	t	
Return	123	N/A	945	0	1068	t	Return	90	60	918	0	1068	t	Return	90	60	918	0	1068	t	Return	123	N/A	945	0	1068	t	Return	90	N/A	945	0	1035	t	
Operations		Waiting			Shunting		Operations		Waiting			Shunting		Operations		Waiting			Shunting		Operations		Waiting			Shunting		Operations		Waiting			Shunting		
To go	60	2	10	2	20	min	To go	110	2	10	2	45	min	To go	110	2	10	2	45	min	To go	60	2	10	2	20	min	To go	60	2	10	2	20	min	
Return	60	2	10	2	20	min	Return	110	2	10	2	45	min	Return	110	2	10	2	45	min	Return	60	2	10	2	20	min	Return	60	2	10	2	20	min	
Total	120	4	40	4	80	min	Total	220	4	40	4	180	min	Total	220	4	40	4	180	min	Total	120	4	40	4	80	min	Total	120	4	40	4	80	min	
Duration		trip	round-trip	year			Duration		trip	round-trip	year			Duration		trip	round-trip	year			Duration		trip	round-trip	year			Duration		trip	round-trip	year			
Total	100%	6,0	12,1	3	137	h	Total	100%	6,0	11,9	3	094	h	Total	100%	6,0	11,9	3	094	h	Total	100%	6,0	12,07	3	137	h	Total	100%	4,78	9,55	2	483	h	
Operating	83%	5,0	10,1	2	617	h	Operating	69%	4,1	8,2	2	141	h	Operating	69%	4,1	8,2	2	141	h	Operating	83%	5,0	10,1	2	617	h	Operating	79%	3,78	7,55	1	963	h	
Waiting	6%	0,3	0,7	173	h		Waiting	6%	0,3	0,7	173	h		Waiting	6%	0,3	0,7	173	h		Waiting	6%	0,3	0,7	173	h		Waiting	7%	0,333	0,67	173	h		
Shunting	11%	0,7	1,3	347	h		Shunting	25%	1,5	3,0	780	h		Shunting	25%	1,5	3,0	780	h		Shunting	11%	0,7	1,33	347	h		Shunting	14%	0,7	1,33	347	h		
Consumption							Consumption							Consumption							Biofuel consumption							Electric consumption							
Diesel	Operating	Waiting			Shunting		Hydrogen	Operating	Waiting			Shunting		Battery	Operating	Waiting			Shunting		Coef.	Operating	Waiting			Shunting		Coef.	Operating	Waiting			Shunting		
	4,5	l/km	30,0	l/h	30,0	l/h		1,3	kg/km	25,0	kg/h	25,0	kg/h		140,0	:Wh/kr	34,0	:Wh/kr	113,0	:Wh/kr		4,5	l/km	30,0	l/h	30,0	l/h		125,0	:Wh/kr	30,0	:Wh/kr	100,0	:Wh/kr	
Conso. (litre)	trip	round-trip	year				Conso. (kg)	trip	round-trip	year				Conso. (kg)	trip	round-trip	year				Conso. (litre)	trip	round-trip	year				Conso. (kW)	trip	round-trip	year				
Operating	98%	1 359	2 718	706 680			Operating	8%	107	213	55 432			Operating	826%	11 480	22 960	5 969 600			Operating	98%	1 359	2 718	706 680			Operating	27	37 750	75 500	19 630 000			
Waiting	1%	10	20	5 200			Waiting	1%	8	17	4 333			Waiting	1%	11	23	5 893			Waiting	1%	10	20	5 200			Waiting	1%	10	20	5 200			
Shunting	1%	20	40	10 400			Shunting	3%	38	75	19 500			Shunting	12%	170	339	88 140			Shunting	1%	20	40	10 400			Shunting	5%	67	133	34 667			
Total	100%	1 389	2 778	722 280			Total	11%	152	305	79 265			Total	840%	11 661	23 322	6 063 633			Total	100%	1 389	2 778	722 280			Total	27	37 827	75 633	19 669 867			
Cost of Rolling Stock							Cost of Rolling Stock							Cost of Rolling Stock							Cost of Rolling Stock							Cost of Rolling Stock							
Opt1. Investment	Locomotive	Tender			Total		Catenary	Operating	Waiting			Shunting		Catenary	Operating	Waiting			Shunting		Opt1. Retrofit	Locomotive	Tender			Total		Opt1. Investment	Locomotive	Tender			Total		
	3,5	m€	0,0	m€	3,5	m€		125,0	:Wh/kr	30,0	kWh	100,0	kWh		125,0	:Wh/kr	30,0	kWh	100,0	kWh		350,0	k€	0,0	m€	0,4	m€		3,7	m€	0,0	m€	3,7	m€	
Opt2. Leasing	Locomotive lease rent & maintenance						Conso. (kW)	trip	round-trip	year		Conso. (kW)	trip	round-trip	year		Conso. (kW)	trip	round-trip	year		Opt2. Leasing	Locomotive lease rent & maintenance						Opt2. Leasing	Locomotive lease rent & maintenance					
	Purchase Price	Lease rate factor	Lease per year		Purchase Price	Lease rate factor		Lease per year		Purchase Price	Lease rate factor		Lease per year		Purchase Price	Lease rate factor		Lease per year																	
	4,1	m€	0,69%	339	k€	4,1		m€	0,69%	339	k€		4,1	m€	0,69%	339		k€	4,1	m€	0,69%		339	k€	3,7	m€	0,57%	253		k€	3,7	m€	0,57%	253	k€
	Maintenance	Yearly maint.	Total		Maintenance	Yearly maint.		Total		Maintenance	Yearly maint.		Total		Maintenance	Yearly maint.		Total		Maintenance	Yearly maint.		Total		Maintenance	Yearly maint.	Total			Maintenance	Yearly maint.	Total		Maintenance	Yearly maint.
	1,2	€/km	0,19	m€	0,53	m€		27 660	55 320	14 383 200		27 660	55 320	14 383 200		27 660	55 320	14 383 200				1,2	€/km	0,19	m€	0,53	m€		1,2	€/km	0,19	m€	0,44	m€	

Processus

Alternative #1 - New Elec./H2. Dual-mode RS	1 2025	2 2026	3 2027	4 2028	5 2029	6 2030	7 2031	8 2032	9 2033	10 2034	11 2035
Total Social Cost (TSC)											
Total Cost of Ownership (TCO)											
Total Cost of Acquisition (TCA)											
Total Investment Cost (TIC)	8 500 000,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Cost of the Rolling Stock	8 700 000,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Number of unit	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Price of the locomotive	3 700 000,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Price of the tender	5 000 000,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Cost of the Infrastructure	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Cost of charging infrastructure	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Cost of track infrastructure	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Cost of signalling	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Funding	200 000,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Grant amount	200 000,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Residual Value	8 700 000,00 €	8 352 000,00 €	8 004 000,00 €	7 656 000,00 €	7 308 000,00 €	6 960 000,00 €	6 612 000,00 €	6 264 000,00 €	5 916 000,00 €	5 568 000,00 €	5 220 000,00 €
	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	-5 220 000,00 €
Depreciation rate	4%										
Residual value locomotive	3 700 000,00 €	3 552 000,00 €	3 404 000,00 €	3 256 000,00 €	3 108 000,00 €	2 960 000,00 €	2 812 000,00 €	2 664 000,00 €	2 516 000,00 €	2 368 000,00 €	2 220 000,00 €
Residual value tender	5 000 000,00 €	4 800 000,00 €	4 600 000,00 €	4 400 000,00 €	4 200 000,00 €	4 000 000,00 €	3 800 000,00 €	3 600 000,00 €	3 400 000,00 €	3 200 000,00 €	3 000 000,00 €
Total Operating Cost (OC)	1 109 262,08 €	1 065 528,06 €	1 023 435,33 €	982 310,39 €	946 787,61 €	934 244,16 €	978 262,38 €	878 856,47 €	957 439,98 €	863 005,85 €	1 141 755,39 €
Cost of Energy	634 122,67 €	570 710,40 €	513 639,36 €	462 275,42 €	416 047,88 €	382 764,05 €	352 142,93 €	323 971,49 €	298 053,77 €	274 209,47 €	257 756,90 €
Hydrogen	634 122,67 €	570 710,40 €	513 639,36 €	462 275,42 €	416 047,88 €	382 764,05 €	352 142,93 €	323 971,49 €	298 053,77 €	274 209,47 €	257 756,90 €
H ₂ price	8,00 €	7,20 €	6,48 €	5,83 €	5,25 €	4,83 €	4,44 €	4,09 €	3,76 €	3,46 €	3,25 €
Yearly variation	-10%	-10%	-10%	-10%	-10%	-8%	-8%	-8%	-8%	-8%	-6%
H ₂ quantity	79 265,33	79 265,33	79 265,33	79 265,33	79 265,33	79 265,33	79 265,33	79 265,33	79 265,33	79 265,33	79 265,33
Electricity	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Including in the Track Access Charges	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Cost of Maintenance	73 090,94 €	82 836,39 €	87 709,12 €	87 709,12 €	87 709,12 €	97 454,58 €	160 800,06 €	77 963,67 €	170 545,52 €	87 709,12 €	370 327,41 €
Cost of the locomotive	50 502,53 €	57 236,20 €	60 603,04 €	60 603,04 €	60 603,04 €	67 336,71 €	111 105,57 €	53 869,37 €	117 839,24 €	60 603,04 €	255 879,49 €
Yearly variation	0,44 €	0,50 €	0,53 €	0,53 €	0,53 €	0,59 €	0,97 €	0,47 €	1,03 €	0,53 €	2,24 €
Cost of the tender	22 588,41 €	25 600,19 €	27 106,09 €	27 106,09 €	27 106,09 €	30 117,87 €	49 694,49 €	24 094,30 €	52 706,28 €	27 106,09 €	114 447,92 €
Yearly variation	0,53 €	0,60 €	0,64 €	0,64 €	0,64 €	0,71 €	1,17 €	0,57 €	1,24 €	0,64 €	2,68 €
Cost of Workforce	57 900,00 €	59 046,42 €	60 121,06 €	61 076,99 €	62 238,73 €	63 422,56 €	64 628,91 €	65 858,20 €	67 110,88 €	68 387,39 €	69 688,17 €
Yearly hours	1833,00	1833,00	1833,00	1833,00	1833,00	1833,00	1833,00	1833,00	1833,00	1833,00	1833,00
Hourly cost	31,59 €	32,21 €	32,80 €	33,32 €	33,95 €	34,60 €	35,26 €	35,93 €	36,61 €	37,31 €	38,02 €
Yearly variation	1,96%	1,98%	1,82%	1,59%	1,90%	1,90%	1,90%	1,90%	1,90%	1,90%	1,90%
Numbers of drivers	1,69	1,69	1,69	1,69	1,69	1,69	1,69	1,69	1,69	1,69	1,69

Processus

Track Access Charges	344 148,48 €	352 934,84 €	361 965,78 €	371 248,85 €	380 791,88 €	390 602,97 €	400 690,49 €	411 063,11 €	421 729,81 €	432 699,87 €	443 982,91 €
<i>RC - Running fee</i>	127 202,40 €	130 509,66 €	133 902,91 €	137 384,39 €	140 956,38 €	144 621,25 €	148 381,40 €	152 239,32 €	156 197,54 €	160 258,68 €	164 425,40 €
<i>Price</i>	0,81 €	0,83 €	0,85 €	0,87 €	0,90 €	0,92 €	0,94 €	0,97 €	0,99 €	1,02 €	1,05 €
<i>Yearly variation</i>	2,60%										
<i>RCE - Electric circulation fee</i>	32 146,40 €	33 612,28 €	35 145,00 €	36 747,61 €	38 423,30 €	40 175,40 €	42 007,40 €	43 922,94 €	45 925,82 €	48 020,04 €	50 209,75 €
<i>Price</i>	0,28 €	0,29 €	0,31 €	0,32 €	0,34 €	0,35 €	0,37 €	0,38 €	0,40 €	0,42 €	0,44 €
<i>Yearly variation</i>	4,56%										
<i>RCTEA - Traction energy transmission & distribution</i>	9 952,80 €	10 151,86 €	10 354,89 €	10 561,99 €	10 773,23 €	10 988,70 €	11 208,47 €	11 432,64 €	11 661,29 €	11 894,52 €	12 132,41 €
<i>Price</i>	0,09 €	0,09 €	0,09 €	0,09 €	0,09 €	0,10 €	0,10 €	0,10 €	0,10 €	0,10 €	0,11 €
<i>Yearly variation</i>	2%										
<i>RCTEB - Traction energy transmission & distribution</i>											
<i>Price</i>	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
<i>Yearly variation</i>	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
<i>RFE - Traction power supply fee</i>	117 488,80 €	119 838,58 €	122 235,35 €	124 680,05 €	127 173,66 €	129 717,13 €	132 311,47 €	134 957,70 €	137 656,85 €	140 409,99 €	143 218,19 €
<i>Price</i>	1,03 €	1,05 €	1,07 €	1,09 €	1,11 €	1,13 €	1,16 €	1,18 €	1,20 €	1,23 €	1,25 €
<i>Yearly variation</i>	2%										
<i>RM - Market fee</i>											
<i>Price</i>	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
<i>Yearly variation</i>	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
<i>RA - Access fee</i>											
<i>Price</i>	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
<i>Yearly variation</i>	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
<i>RS - Saturation fee</i>											
<i>Price</i>	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
<i>Yearly variation</i>	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
<i>RP - Special fee</i>											
<i>Price</i>	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
<i>Yearly variation</i>	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
<i>VAT</i>	20%										
Cost of Insurance	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
<i>Amount</i>	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
<i>Yearly variation</i>	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
TCO	9 609 262,08 €	1 065 528,06 €	1 023 435,33 €	982 310,39 €	946 787,61 €	934 244,16 €	978 262,38 €	878 856,47 €	957 439,98 €	863 005,85 €	-4 078 244,61 €
<i>Discount rate</i>	9,50%										
<i>Discount factor</i>	0,91	0,83	0,76	0,70	0,64	0,58	0,53	0,48	0,44	0,40	0,37
<i>NPV</i>	8 775 581,81 €	888 662,09 €	779 503,46 €	683 269,85 €	601 425,68 €	541 970,54 €	518 270,54 €	425 211,50 €	423 042,98 €	348 235,10 €	-1 502 858,04 €
TCO NPV 2025 - 2035	12 482 315,51 €										

Cas d'étude

Solution de Référence Simple-mode diesel



Loco diesel + Wagon

2 - Remplacement à l'échelle d'une flotte

Alternative #1 Simple-mode H2 ICE



Loco H2 ICE + Wagon

Solution de retrofit
consistant à moderniser la
locomotive de référence
pour utiliser de l'hydrogène
(moteur combustion
hydrogène)

Alternative #2 Simple-mode H2 FC



Loco H2 FC + Wagon

Solution de remplacement
consistant en une locomotive
hydrogène utilisant des PAC
(piles à combustible)

Paramètres

Technical Parameters	Reference Solution	Decarbonized Alternatives	
	Diesel	H ₂ Replacement	H ₂ Retrofit
Techno	ICE Diesel	FC H ₂	ICE H ₂
Fleet	10,00	10,00	10,00
Yearly frequency (trains)	260,00	260,00	260,00
Electrified distance (km)	220,00	220,00	220,00
Yearly elec. distance	1 144 000,00	1 144 000,00	1 144 000,00
Non-elec distance (km)	82,00	82,00	82,00
Yearly non-elec distance	426 400,00	426 400,00	426 400,00
Total distance (km)	1 570 400,00	1 570 400,00	1 570 400,00
Speed (km/h)	60,00	60,00	60,00
Operating time (h)	5,03	5,03	5,03
Waiting operation (nb.)	4,00	4,00	4,00
Duration (min)	10,00	10,00	10,00
Waiting time (h)	0,67	0,67	0,67
Shunting operation (nb..)	4,00	4,00	4,00
Duration (min)	20,00	20,00	20,00
Shunting time (h)	1,33	1,33	1,33
Yearly operating	26 173,33	26 173,33	26 173,33
Yearly waiting	1 733,33	1 733,33	1 733,33
Yearly shunting	3 466,67	3 466,67	3 466,67
Total time (h)	31 373,33	31 373,33	31 373,33
Operating consumption (l/km;kg/km)	4,50	1,25	1,35
Operating consumption (kWh/km)	0,00	125,00	125,00
Waiting consumption (l/h;kg/h)	30,00	25,00	25,00
Shunting consumption (l/h;kg/h)	30,00	25,00	25,00
Total op. consumption	7 066 800,00	533 000,00	575 640,00
Total op. consumption (2)	-	143 000 000,00	143 000 000,00
Total wait. consumption	52 000,00	43 333,33	43 333,33
Total shunt. consumption	104 000,00	86 666,67	86 666,67
Total consumption (l/kg)	7 222 800,00	663 000,00	705 640,00
Total consumption (kWh/km)		143 000 000,00	143 000 000,00

Financial Parameters				
Fiscal Period	Start	2025	2025	2025
	End	2040	2040	2040
Lifetime		15,00	15,00	15,00
Discount Rate		9,50%	9,50%	9,50%
Depreciation		4,00%	4,00%	4,00%
Investment		3 500 000,00 €	5 000 000,00 €	750 000,00 €
Funding		0,00 €	200 000,00 €	15 000,00 €
Cost of energy		1,25 €	8,00 €	8,00 €
Total cost of energy		9 014 054,40 €	5 304 000,00 €	5 645 120,00 €
Annual trend		2,00%	-2,00%	-2,00%
Cost of maintenance		0,80	0,85	0,85
Annual trend		0,00%	0,00%	0,00%
Total cost of maintenance		1 256 320,00 €	1 334 840,00 €	1 334 840,00 €
Driver hours		1 833,00	1 833,00	1 833,00
Driver cost/hour		31,59 €	31,59 €	31,59 €
Drivers needed		17,12	17,12	17,12
Cost of drivers		991 083,60 €	991 083,60 €	991 083,60 €
Workers needed		0,00	0,00	5,00
Worker cost/hour		45,00 €	45,00 €	45,00 €
Retrofit hours		0,00	0,00	150,00
Cost of workers		0,00 €	0,00 €	67 500,00 €
Training hours		0,00	15,00	15,00
Cost per hour		100,00 €	100,00 €	100,00 €
Total cost of training		0,00 €	25 673,76 €	25 673,76 €
Total cost of workforce			0,00 €	0,00 €
Running fee		0,00 €	0,00 €	0,00 €
Annual trend		0,00%	0,00%	0,00%
Total		0,00 €	0,00 €	0,00 €
Electric circulation fee		0,00 €	0,00 €	0,00 €
Annual trend		0,00%	0,00%	0,00%
Total		0,00 €	0,00 €	0,00 €
Special fee		0,00 €	0,00 €	0,00 €
Annual trend		0,00%	0,00%	0,00%
Total		0,00 €	0,00 €	0,00 €
VAT		20,00%	20,00%	20,00%
Total Track Access Charges		254 404,80 €	3 444 230,40 €	3 444 230,40 €
Total		15 015 862,80 €	16 099 827,76 €	12 258 447,76 €
Total		0,00 €	1 174 000,00 €	1 174 000,00 €
Market fee		0,00 €	0,00 €	0,00 €
Annual trend		0,00%	0,00%	0,00%

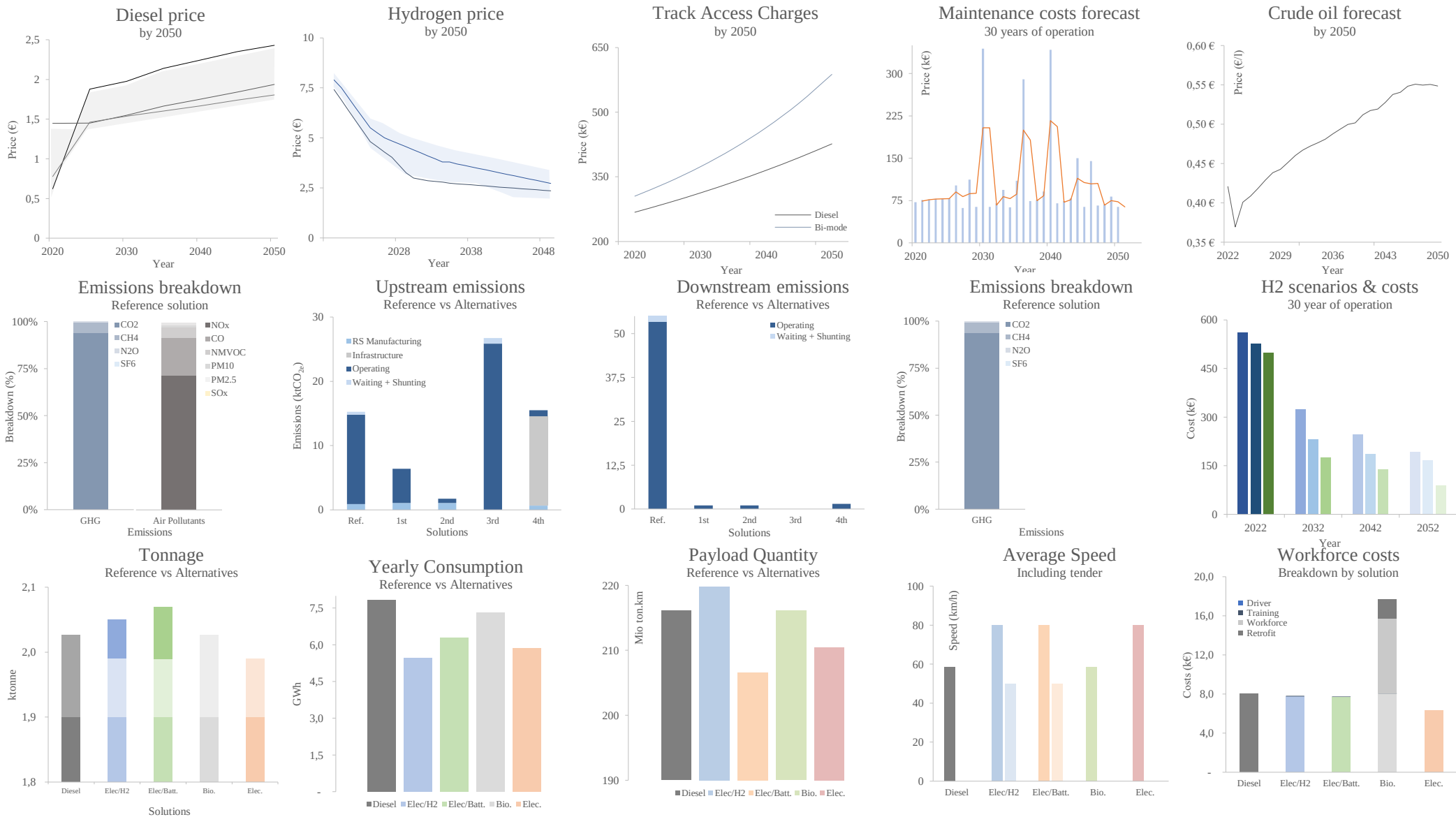
Alternative 1 – Retrofit (H2 ICE)

	Fiscal Period											
	Start											
	1 2025	2 2026	3 2027	4 2028	5 2029	6 2030	7 2031	8 2032	9 2033	10 2034	11 2035	12 2036
Option 1 - H₂ Retrofit	H₂ Retrofit											
Roll-out Plan	8											
	2	6										
	2	2	3									
		4	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			7	3								
				10	10	10	10	10	10	10	10	10
Investment	0,00 €											
	1 500 000,00 €	0,00 €										
		1 500 000,00 €	0,00 €									
			2 250 000,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
				2 250 000,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Residual Value	1 400 000,00 €											
	2 800 000,00 €	1 260 000,00 €										
	1 400 000,00 €	2 520 000,00 €	1 120 000,00 €									
		1 260 000,00 €	3 360 000,00 €	980 000,00 €								
			1 120 000,00 €	2 940 000,00 €	840 000,00 €	700 000,00 €	560 000,00 €	420 000,00 €	280 000,00 €	140 000,00 €	0,00 €	
				980 000,00 €								
					840 000,00 €	700 000,00 €	560 000,00 €	420 000,00 €	280 000,00 €	140 000,00 €	0,00 €	
Funding	0,00 €											
	30 000,00 €	0,00 €										
		30 000,00 €	0,00 €									
			45 000,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
				45 000,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Cost of Energy	7 211 243,52 €											
	1 129 024,00 €	5 516 601,29 €										
		2 212 887,04 €	2 813 466,66 €									
			3 795 101,27 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
				5 313 141,78 €	5 206 878,95 €	5 102 741,37 €	5 000 686,54 €	4 900 672,81 €	4 802 659,35 €	4 706 606,17 €	4 612 474,04 €	4 520 224,56 €
Cost of Maintenance	1 005 056,00 €											
	266 968,00 €	753 792,00 €										
		533 936,00 €	376 896,00 €									
			934 388,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
				1 334 840,00 €	1 334 840,00 €	1 334 840,00 €	1 334 840,00 €	1 334 840,00 €	1 334 840,00 €	1 334 840,00 €	1 334 840,00 €	1 334 840,00 €

Alternative 2 – Remplacement (H2 FC)

	Fiscal Period											
	Start											
	1 2025	2 2026	3 2027	4 2028	5 2029	6 2030	7 2031	8 2032	9 2033	10 2034	11 2035	12 2036
Option 2 - H ₂ Replacement						H ₂ Replacement						
Roll-out Plan	10	10	10	10	10	8						
						2	6					
	0	0	0	0	0	2	2	3				
							4	3	0	0	0	0
								7	3			
									10	10	10	10
Investment	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €						
	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	10 000 000,00 €	0,00 €					
							10 000 000,00 €	0,00 €				
								15 000 000,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
									15 000 000,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Residual Value	1 400 000,00 €	1 260 000,00 €	1 120 000,00 €	980 000,00 €	840 000,00 €	700 000,00 €						
						1 400 000,00 €	560 000,00 €					
						5 000 000,00 €	1 120 000,00 €	420 000,00 €				
						10 000 000,00 €	4 800 000,00 €	1 260 000,00 €	280 000,00 €			
							9 600 000,00 €	4 600 000,00 €	840 000,00 €	140 000,00 €	0,00 €	
							5 000 000,00 €	9 200 000,00 €	4 400 000,00 €			
							10 000 000,00 €	4 800 000,00 €	8 800 000,00 €	4 200 000,00 €	4 000 000,00 €	3 800 000,00 €
								9 600 000,00 €	4 600 000,00 €	8 400 000,00 €	8 000 000,00 €	7 600 000,00 €
								5 000 000,00 €	9 200 000,00 €	4 400 000,00 €		
								15 000 000,00 €	4 800 000,00 €	8 800 000,00 €	4 200 000,00 €	4 000 000,00 €
									14 400 000,00 €	4 600 000,00 €	8 400 000,00 €	8 000 000,00 €
									5 000 000,00 €	13 800 000,00 €	4 400 000,00 €	
									15 000 000,00 €	4 800 000,00 €	13 200 000,00 €	4 200 000,00 €
										14 400 000,00 €	4 600 000,00 €	12 600 000,00 €
											13 800 000,00 €	4 400 000,00 €
												13 200 000,00 €
						10 000 000,00 €	19 600 000,00 €	33 800 000,00 €	47 400 000,00 €	45 400 000,00 €	43 400 000,00 €	41 400 000,00 €
Funding						0,00 €						
						400 000,00 €	0,00 €					
							400 000,00 €	0,00 €				
								600 000,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
									600 000,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Cost of Energy	9 014 054,40 €	9 194 335,49 €	9 378 222,20 €	9 565 786,64 €	9 757 102,37 €	7 961 795,54 €						
						958 879,18 €	6 090 773,59 €					
							1 879 403,20 €	3 106 294,53 €				
								3 223 176,48 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
									4 512 447,07 €	4 422 198,13 €	4 333 754,17 €	4 247 079,08 €

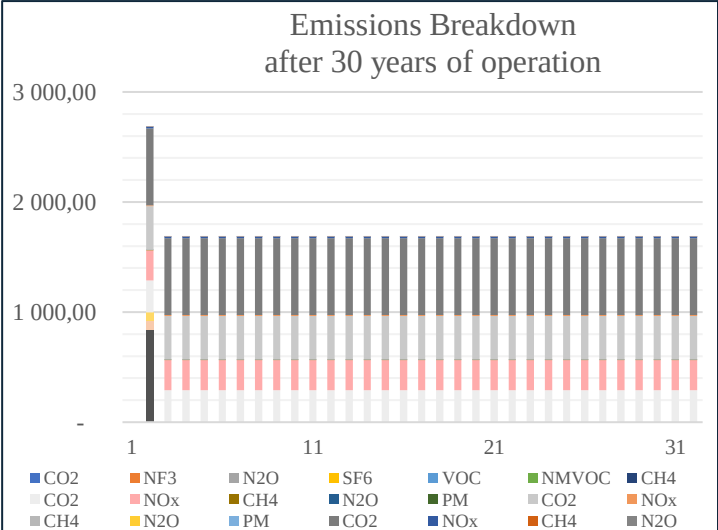
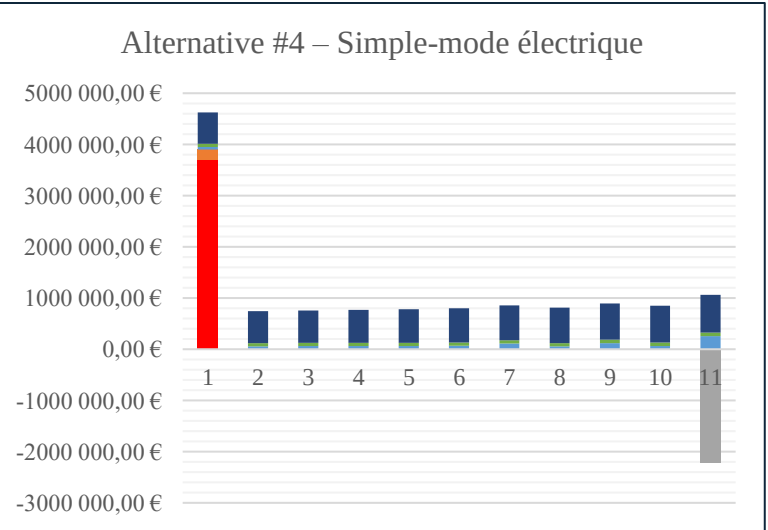
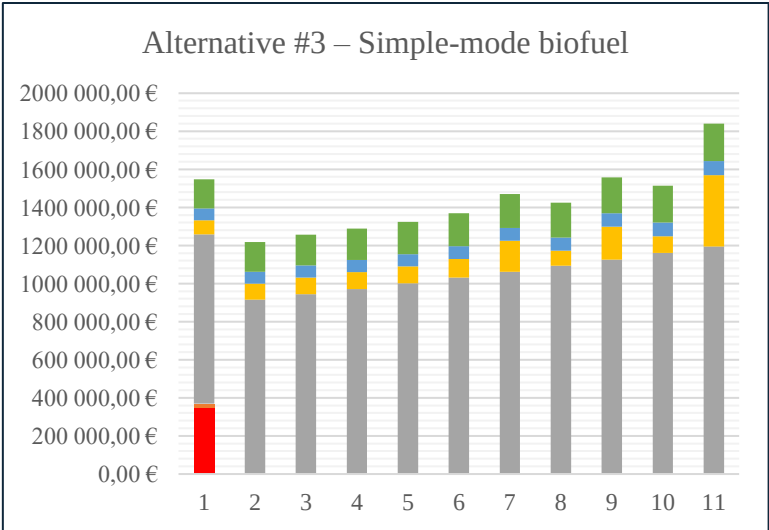
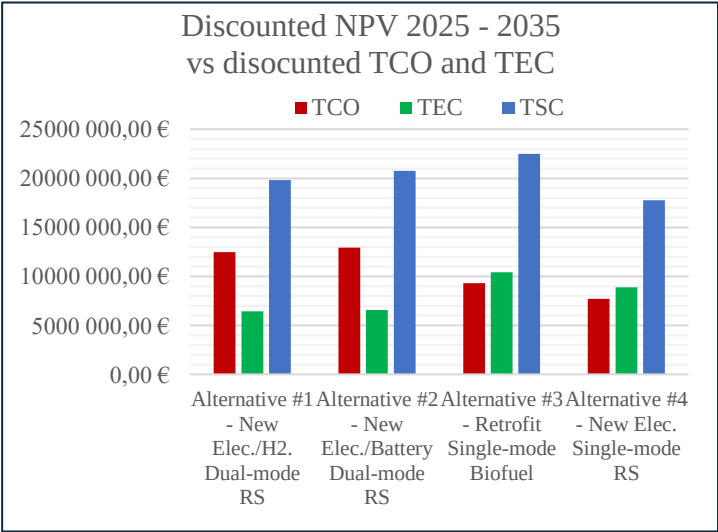
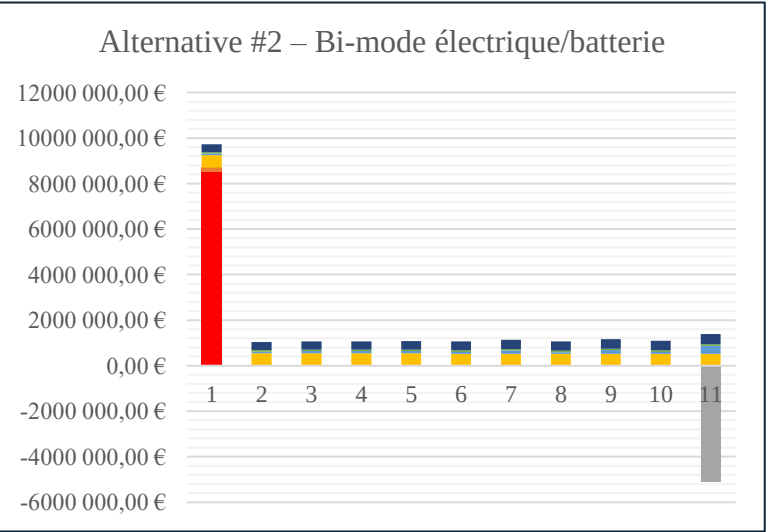
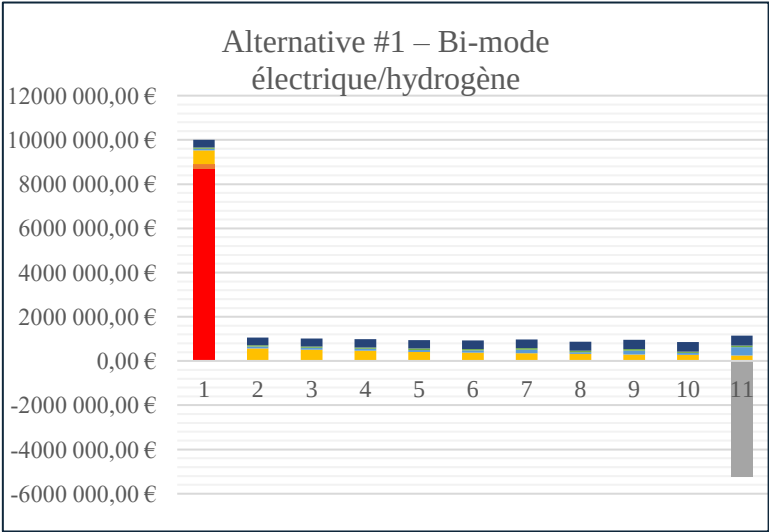
Scénarios



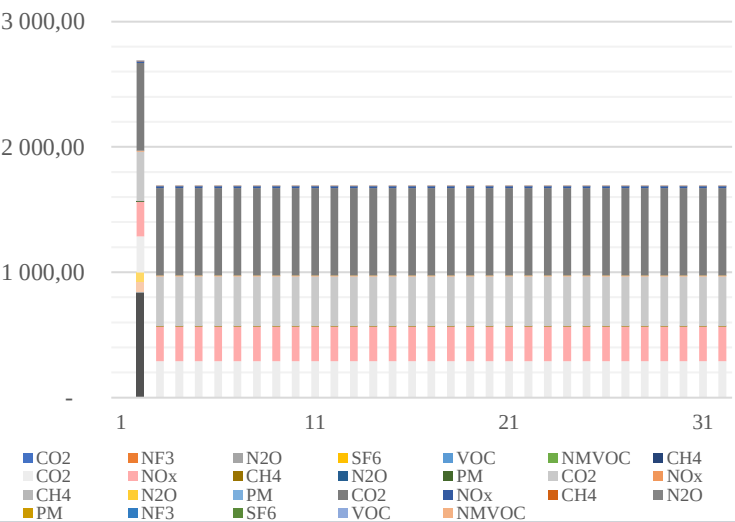


Résultats

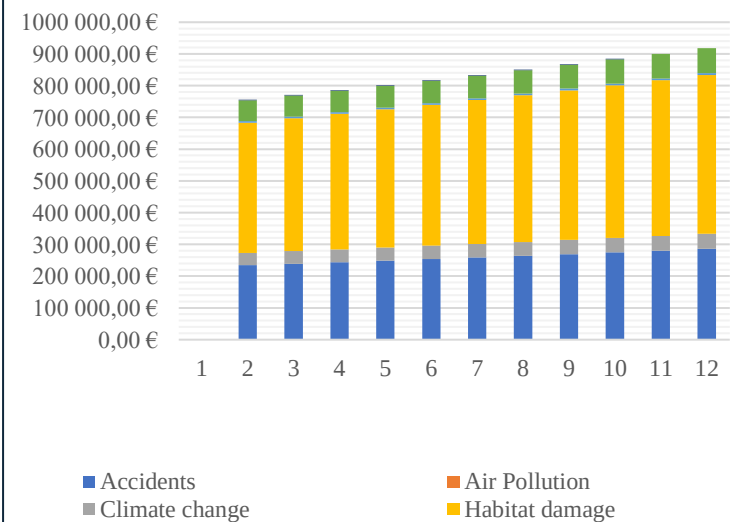
Résultats



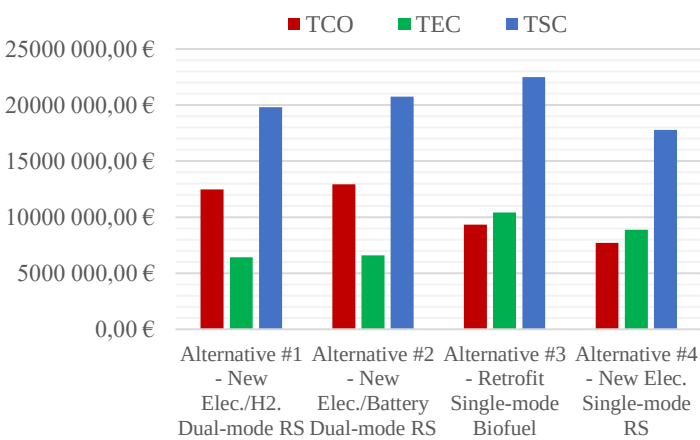
Emissions Breakdown
after 30 years of operation



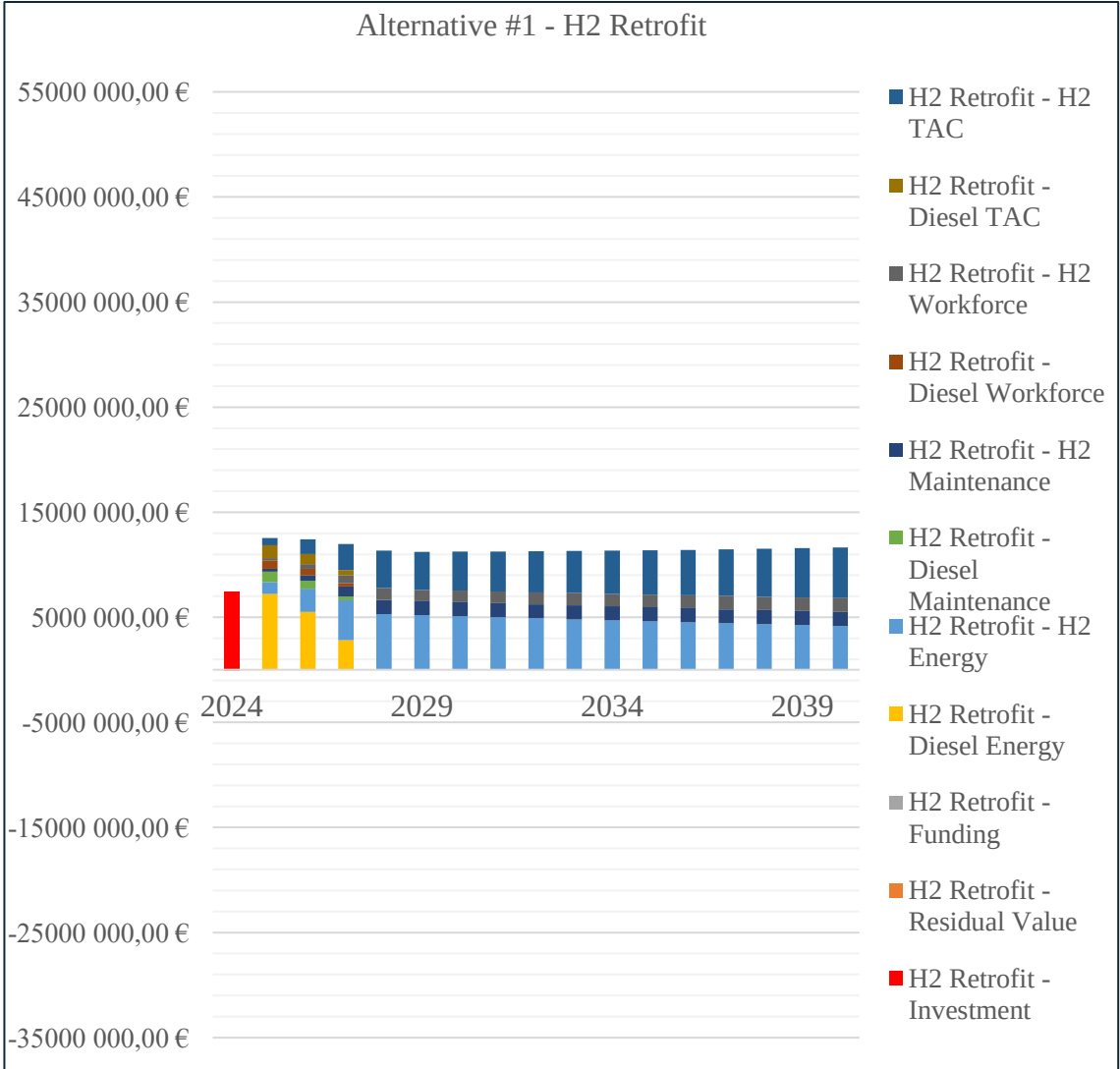
Total External Cost (TEC)



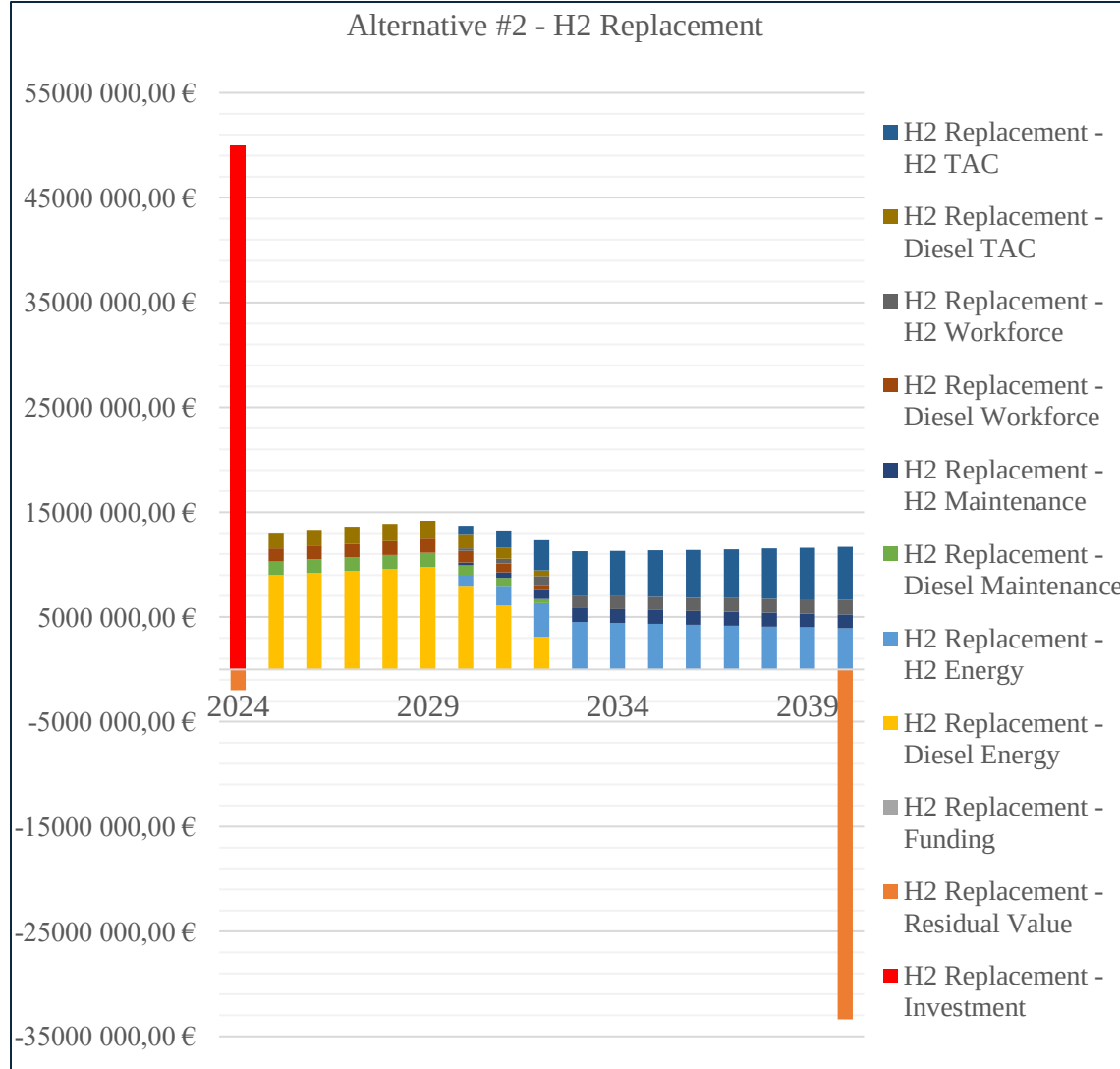
Discounted NPV 2025 - 2035
vs disocunted TCO and TEC



Alternative #1 - H2 Retrofit

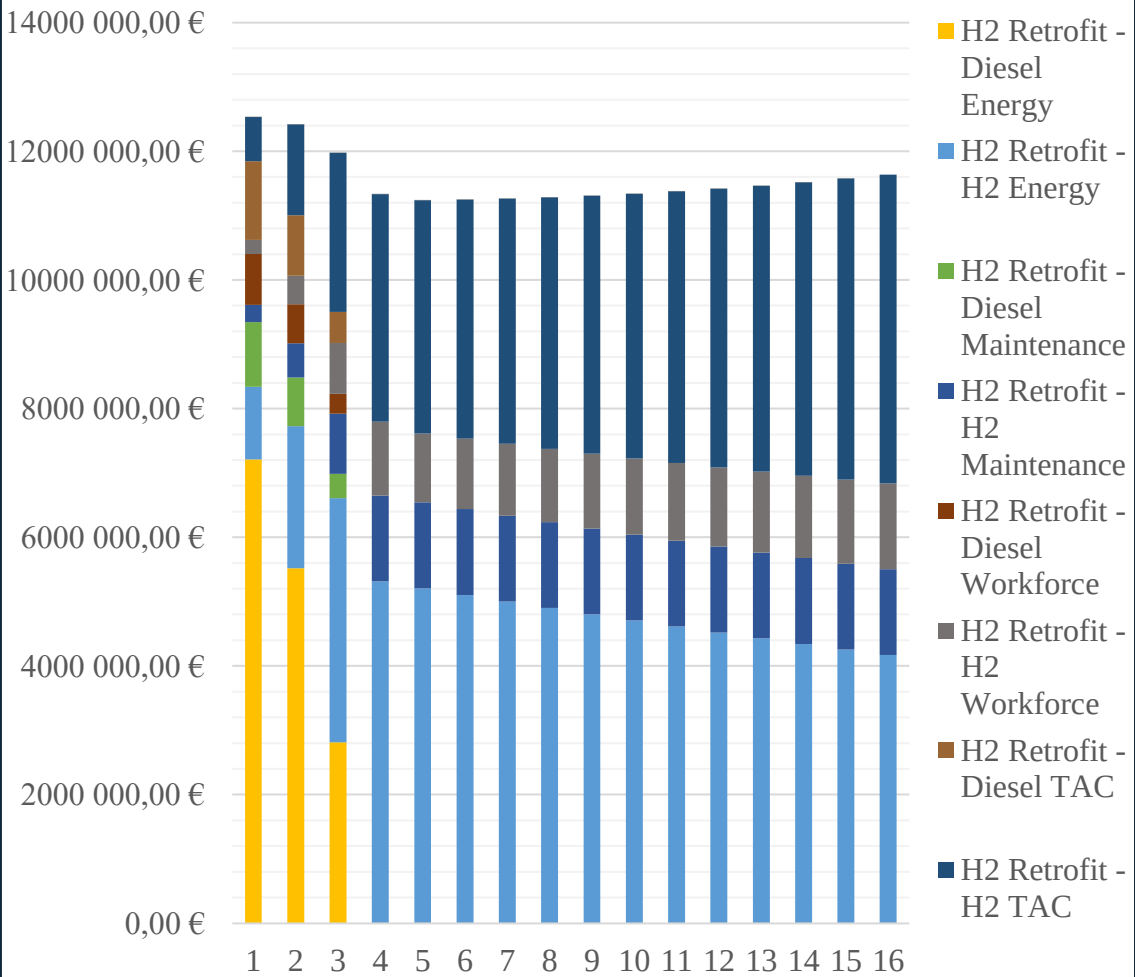


Alternative #2 - H2 Replacement

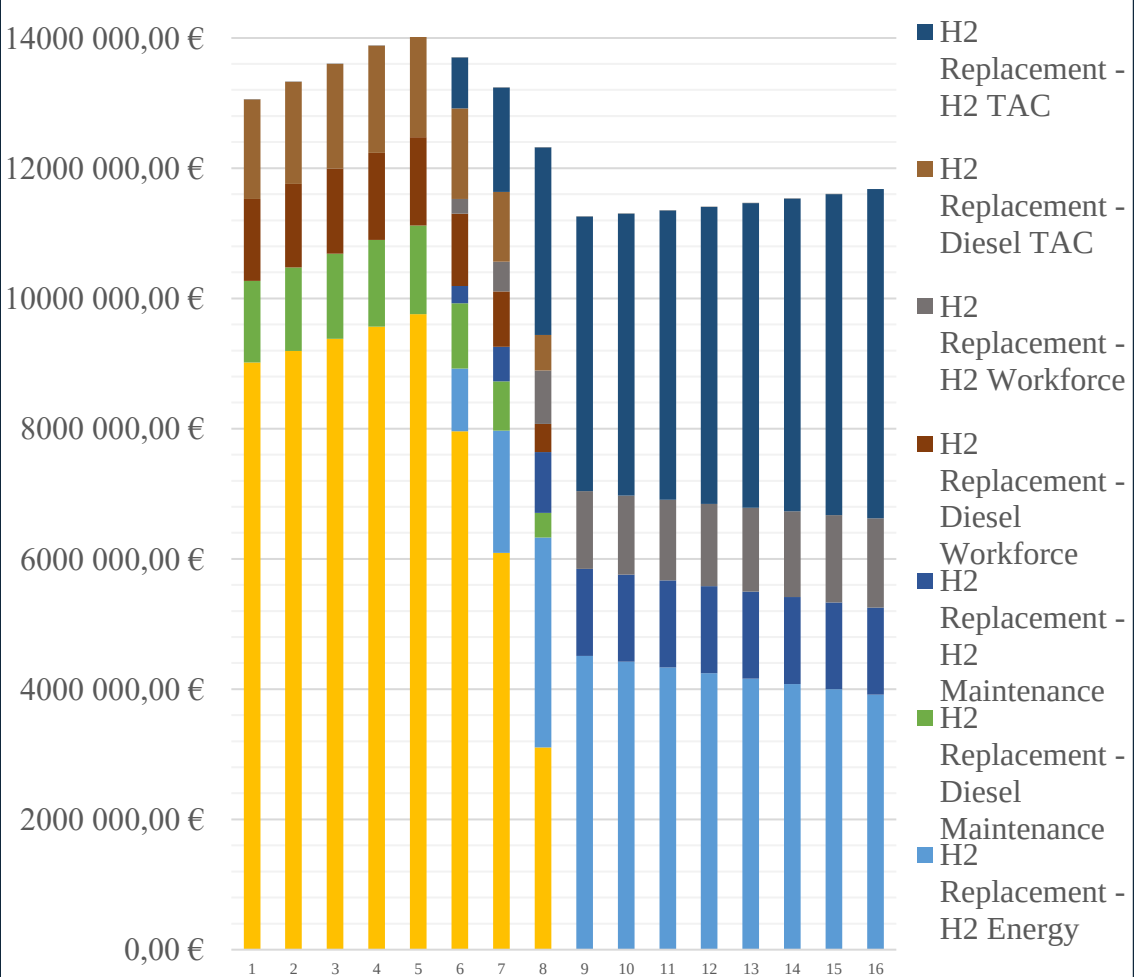


Résultats

H2 Retrofit
Operational Costs from 2025 to 2040



H₂ Replacement
Operational Costs from 2025 to 2040



Discussion

Discussion

- Le marché de la décarbonisation ferroviaire est caractérisé par une hétérogénéité de solutions en lien avec la variété d'applications et de cas d'utilisation.
- La méthode utilisée permet de mesurer efficacement la compétitivité des alternatives décarbonées et de mieux comprendre leurs domaines de pertinence. La comparaison n'est possible qu'en considérant la faisabilité technique, l'impact environnemental et l'équation économique.
- Le TSC offre une vue d'ensemble des coûts, mais il peut y avoir des facteurs extérieurs tels que les politiques publiques qui ont un impact significatif sur le prix des solutions et qui ne peuvent pas être quantifiés.
- Le processus est répliquable sur d'autres missions mais des ajustements sont à faire, surtout à l'échelle d'une flotte avec un roll-out plan déterminé.
- La solution de retrofit est une alternative intéressante permettant de réutiliser le matériel roulant existant mais ce n'est pas toujours la solution économiquement et écologiquement la plus pertinente.
- Il y a un manque dans la littérature académique au sujet des coûts externes pour les alternatives décarbonées qui ne permet pas d'avoir, à l'heure actuelle, une vision exhaustive des externalités.



Prochaines étapes

Prochaines étapes

- Ce travail est actuellement reproduit sur d'autres cas en France, notamment chez Cemex, Eurovia, Egiom, le groupe CB, Axéréal ou encore Soufflet.
- Ce travail est également reproduit sur des cas aux États-Unis et au Canada. L'objectif est de démontrer le lien entre le choix des alternatives décarbonées, l'architecture du réseau et la structure du marché, avec pour finalité d'apporter des réponses précises aux pouvoirs publics.
- Un travail doit être mené pour prendre en compte les autres externalités pouvant avoir un impact important sur le TEC et par conséquent le TSC.
- Il pourrait être pertinent de prendre en compte différents scénarios concernant l'électrification partielle ou frugale.
- Les travaux sur les coûts d'abattement doivent être vérifiés et renforcés.
- Un travail de comparaison avec le fret routier sera prochainement traité permettant ainsi de mettre en lumière les différences de choix des alternatives décarbonées.
- Une partie prospective avec des enquêtes auprès des acteurs clés concernant l'évolution des composantes clés du TCO pourra être réalisée.

Merci pour votre attention !

Antoine BELLEGUÏE

antoine.belleguie@univ-eiffel.fr

+33 (0)7 63 51 76 93

