

Etude d'un réseau de Trolleybus à Limoges



1. Mise en situation

En France, le transport représente environ un tiers de la consommation totale d'énergie. Il est basé à 98% sur la combustion de carburants fossiles, majoritairement dérivés du pétrole. Cette consommation génère différentes nuisances :

- Épuisement des ressources fossiles,
- Augmentation de l'effet de serre,
- Émission de divers polluants nocifs pour l'environnement et pour l'homme,
- Nuisances sonores.

La plupart des grandes villes mettent alors en place un réseau de transports en commun pour réduire le trafic automobile et pour garantir la mobilité des personnes n'ayant pas accès aux moyens de transport individuels.

Ces réseaux sont le plus souvent basés sur l'utilisation d'autobus à moteur diesel qui génèrent également des nuisances environnementales.

Certaines villes ont fait le choix de véhicules de transport en commun alimentés par l'énergie électrique, le plus courant étant le tramway.

L'agglomération de Limoges, quant à elle, est équipée depuis de nombreuses années de trolleybus. Il s'agit de véhicules équipés de pneumatiques, roulant sur les mêmes chaussées que les autobus, mais alimentés électriquement par des lignes aériennes.

Le coût d'investissement de ce moyen de transport est bien moindre que celui d'un réseau de tramway, pour des bénéfices environnementaux similaires.

Le trolleybus est, de plus, particulièrement adapté au relief important de la ville.



2. Comparer les impacts environnementaux de plusieurs modes de transport

Dans cette partie, nous allons comparer les impacts environnementaux liés à l'utilisation du trolleybus, de l'autobus et de la voiture particulière.

Les trolleybus et autobus exploités par la STCL sont développés par la société IRISBUS et ont comme noms commerciaux respectivement CRISTALIS et CITELIS. Le véhicule particulier utilisé pour l'étude comparative sera une voiture RENAULT CLIO 1.5dCi.

Le tableau suivant permet de comparer les émissions de gaz à effet de serre produits par l'utilisation des différents véhicules. Les résultats proviennent de la méthode Bilan Carbone® développée par l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie).

			
Type véhicule	Trolleybus	Autobus	Voiture particulière
Nom commercial	CRISTALIS	CITELIS	CLIO
Energie d'alimentation	Electricité	Gazole	Gazole
Consommation moyenne	2,7 kWh pour 1 km = 9,72 MJ.km ⁻¹	42 L pour 100 km	4 L pour 100 km
Emission de gaz à effet de serre	92 g Eq CO ₂ /km	1409 g Eq CO ₂ /km	127 g Eq CO ₂ /km
	g Eq CO ₂ = gramme équivalent CO ₂		
Nombre de personnes transportées	96 maxi	105 maxi	5 maxi

Tableau 1. Caractéristiques des véhicules

Q.1. Déterminer l'émission de gaz à effet de serre par passager pour chacun des véhicules lorsqu'il est à son remplissage maximal. Classer alors les véhicules en fonction de leurs performances en termes d'émission de gaz à effet de serre.

Le remplissage moyen constaté pour les trajets en véhicule particulier est de 1,3 passagers par véhicule.

Q.2. Comparativement au remplissage moyen d'un véhicule automobile, déterminer à partir de combien de passagers les autres modes de transport sont plus performants concernant l'émission de gaz à effet de serre.

Nous allons maintenant évaluer les quantités d'énergies primaires nécessaires à l'utilisation du trolleybus. Il faut intégrer pour cela les rendements de l'acheminement et de la distribution d'électricité visibles sur le document réponse DR1. La largeur des flèches sur le diagramme de flux est proportionnelle à la quantité d'énergie qui transite.

Q.3. A partir des rendements de l'alimentation et du transport d'électricité, déterminer et inscrire près des flèches de flux du document réponse DR1, l'énergie électrique nécessaire (en MJ.km^{-1}) en sortie et en entrée du réseau de transport d'électricité (acheminement et distribution).

Nous aurons ensuite besoin de la répartition des sources d'énergie utilisées pour la production d'électricité en France, représentée sur le graphique suivant.

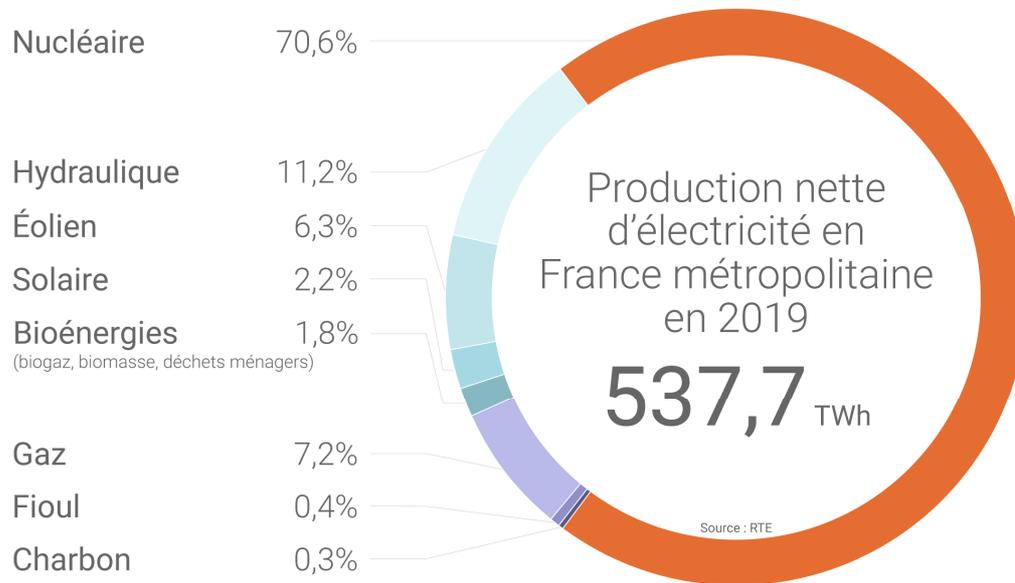


Figure 1. Bouquet énergétique français de la production d'électricité en 2019 (source RTE)

Q.4. Classer les différents modes de production d'électricité de la Figure 1 en trois groupes : énergies renouvelables, énergies fossiles ou énergie fissile (fission nucléaire). Répondre sur la copie. Déterminer la part d'électricité (en %) de chacun des trois groupes d'énergies (renouvelable, fossile et fissile) et en déduire l'énergie consommée correspondante (en MJ.km^{-1}). Reporter ces valeurs sur le diagramme de flux énergétique du document réponse DR1.

Q.5. A partir des rendements énergétiques de chacun des modes de production d'électricité, en déduire les quantités d'énergie primaire nécessaire au fonctionnement du trolleybus (en MJ.km^{-1}). Reporter ces valeurs près de chaque flèche du diagramme de flux sur le document réponse DR1.

Nous nous intéressons à présent à l'utilisation de l'autobus à moteur diesel, nécessitant du gazole comme carburant nécessaire à son fonctionnement.

Le diagramme de flux du document DR1 permet de remonter à l'énergie primaire nécessaire.

On donne le pouvoir calorifique du gazole : $C = 38\,080 \text{ kJ.L}^{-1}$.

Q.6. A partir du pouvoir calorifique du gazole, convertir la consommation de l'autobus en MJ.km^{-1} et la reporter sur le diagramme de flux. A l'aide du rendement du processus de raffinage, en déduire la quantité d'énergie primaire nécessaire et la reporter sur le diagramme.

Q.7. Au regard de plusieurs critères environnementaux (production de gaz à effet de serre, consommation de ressources non renouvelables, etc.) conclure sur la pertinence du trolleybus par rapport au bus à moteur diesel.

3. Etude de la chaîne de puissance d'un trolleybus

Dans cette partie, nous allons vérifier si la motorisation des trolleybus est adaptée à leur usage urbain.

En l'absence de pente, pour avancer à vitesse constante, un véhicule doit lutter principalement contre les efforts suivants :

- La résistance au roulement due à la déformation des pneumatiques,
- La traînée aérodynamique due aux frottements de l'air autour de la carrosserie.

Le graphique suivant montre l'évolution théorique de la puissance nécessaire pour déplacer le véhicule en fonction de sa vitesse (sur le plat et à vitesse constante) :

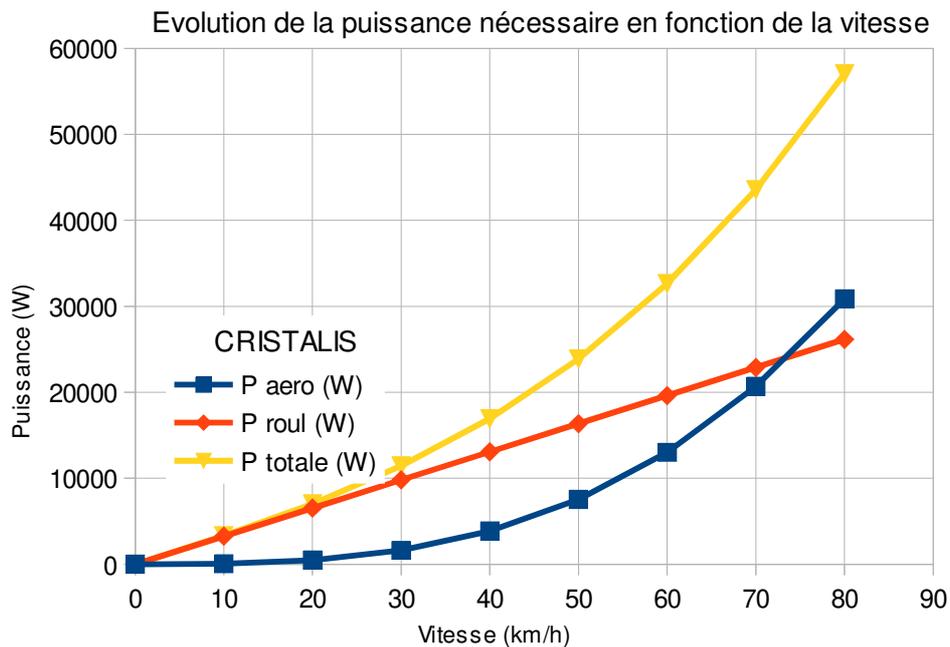


Figure 2. Puissance utile sur le plat à vitesse constante

Q.8. A partir du graphique précédent, déterminer à partir de quelle vitesse les effets aérodynamiques deviennent supérieurs à la résistance au roulement. En déduire contre quel type d'effort doit lutter principalement le trolleybus dans les conditions normales d'utilisation (circulation en ville).

Les organes de la chaîne de puissance du trolleybus et leurs caractéristiques sont donnés dans le Tableau 2, page suivante.

En fonctionnement normal, le trolleybus est alimenté électriquement par 2 lignes aériennes conductrices (LAC) via deux perches.

En l'absence de réseau électrique, le trolleybus peut fonctionner de façon autonome (mode secours) grâce à un moteur thermique et une génératrice produisant de l'énergie électrique (voir document technique).

Désignation	Illustration	Paramètres énergétiques	Paramètres cinématiques
Moteur thermique diesel		Puissance mécanique maximale : $P_{dies-m} = 92 \text{ kW}$ (125 ch) Rendement : $\eta_{dies} = 0,30$	Fréquence de rotation maximale : $N_{dies-m} = 4500 \text{ tr. min}^{-1}$
Génératrice		Rendement : $\eta_{gen} = 0,90$	
Coffre d'alimentation électrique		Rendement : $\eta_{alim} = 0,95$	
Moteur asynchrone triphasé		Puissance mécanique maximale : $P_{mot-m} = 60 \text{ kW}$ Rendement : $\eta_{mot} = 0,90$	Fréquence de rotation maximale : $N_{mot-m} = 8817 \text{ tr. min}^{-1}$
Réducteur à engrenages (trains épicycloïdaux)		Rendement : $\eta_{red} = 0,95$	Rapport de transmission : $k = 0,05055$
Roue			Diamètre des pneumatiques : $D = 0,981 \text{ m}$

Tableau 2. Caractéristiques cinématiques et énergétiques des organes de la chaîne d'énergie

Q.9. Sur le diagramme de blocs internes SysML du document réponse DR2, indiquer la nature des énergies (mécanique de rotation, mécanique de translation, électrique ou thermique) sur chaque connexion de flux.

D'après les courbes de la Figure 2, la puissance utile nécessaire au déplacement sur le plat à une vitesse constante de 50 km.h^{-1} est $P_{ut-50} = 24 \text{ kW}$.

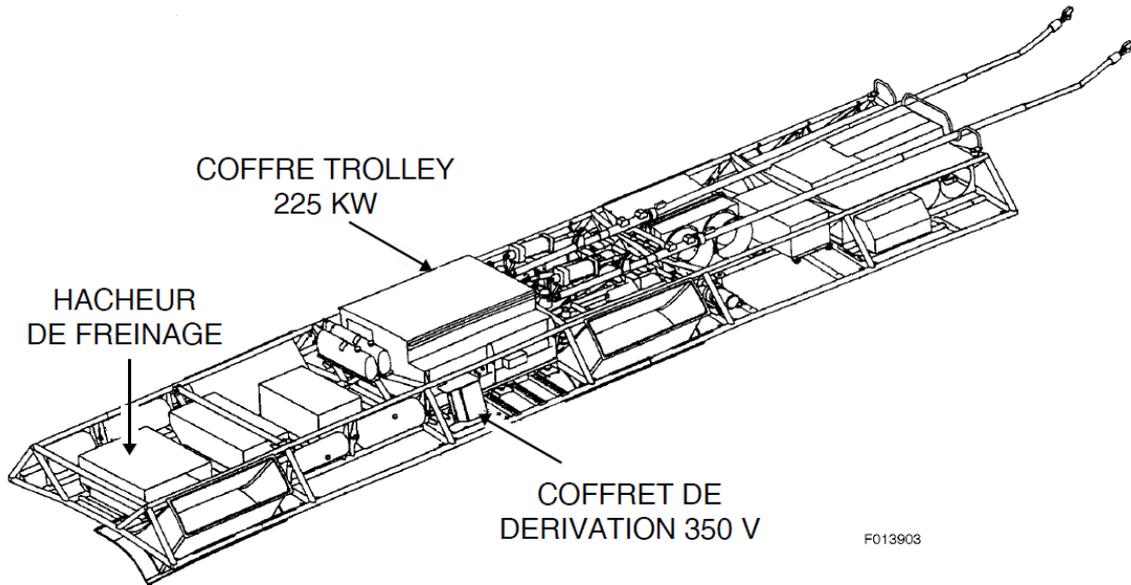
Q.10. A partir des données énergétiques du Tableau 2, calculer la puissance mécanique minimale $P_{dies-50}$ du moteur thermique pour rouler dans ces conditions, en l'absence de réseau électrique. Conclure sur la pertinence du choix de la puissance du moteur thermique effectivement utilisé.

Quel que soit le mode de fonctionnement (normal ou secours) c'est le moteur électrique qui transmet la puissance aux roues via le réducteur.

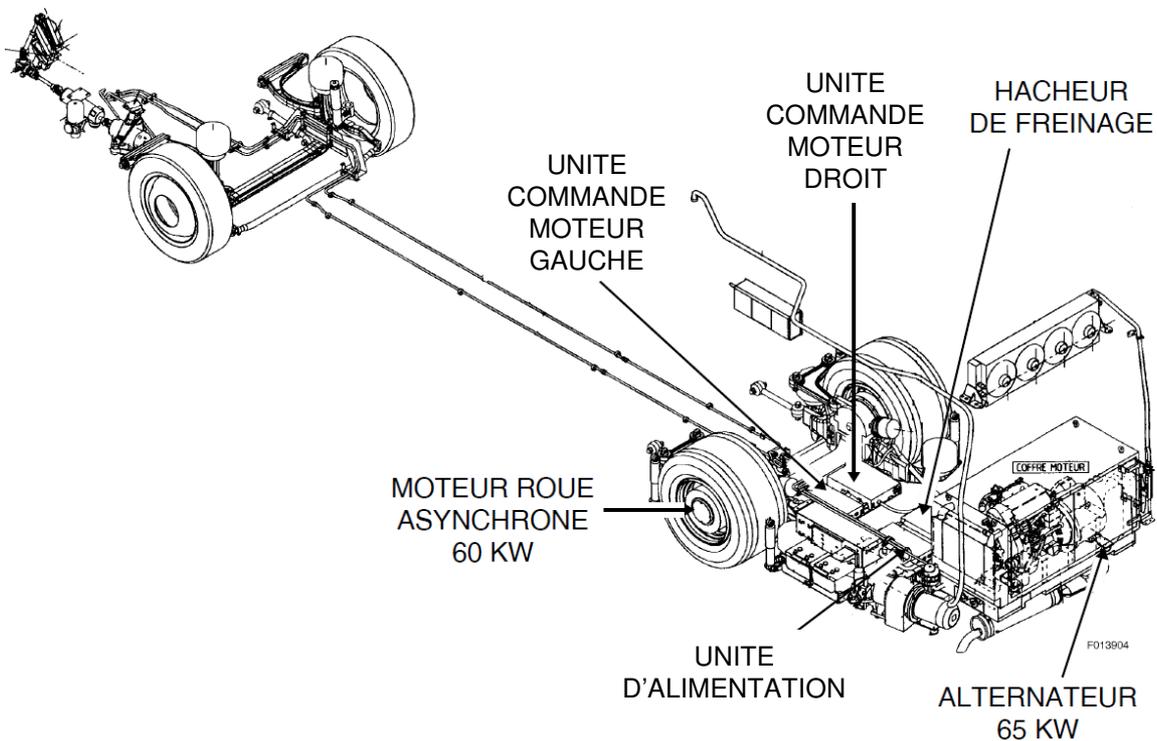
Q.11. A partir des données cinématiques du Tableau 2, connaissant la fréquence de rotation maximale du moteur électrique, **calculer** la vitesse d'avance maximale du trolleybus V_{maxi} en km.h^{-1} . **Conclure** sur la pertinence de cette vitesse pour une utilisation urbaine du véhicule.

Document technique : implantation des composants sur les trolleybus CRISTALIS

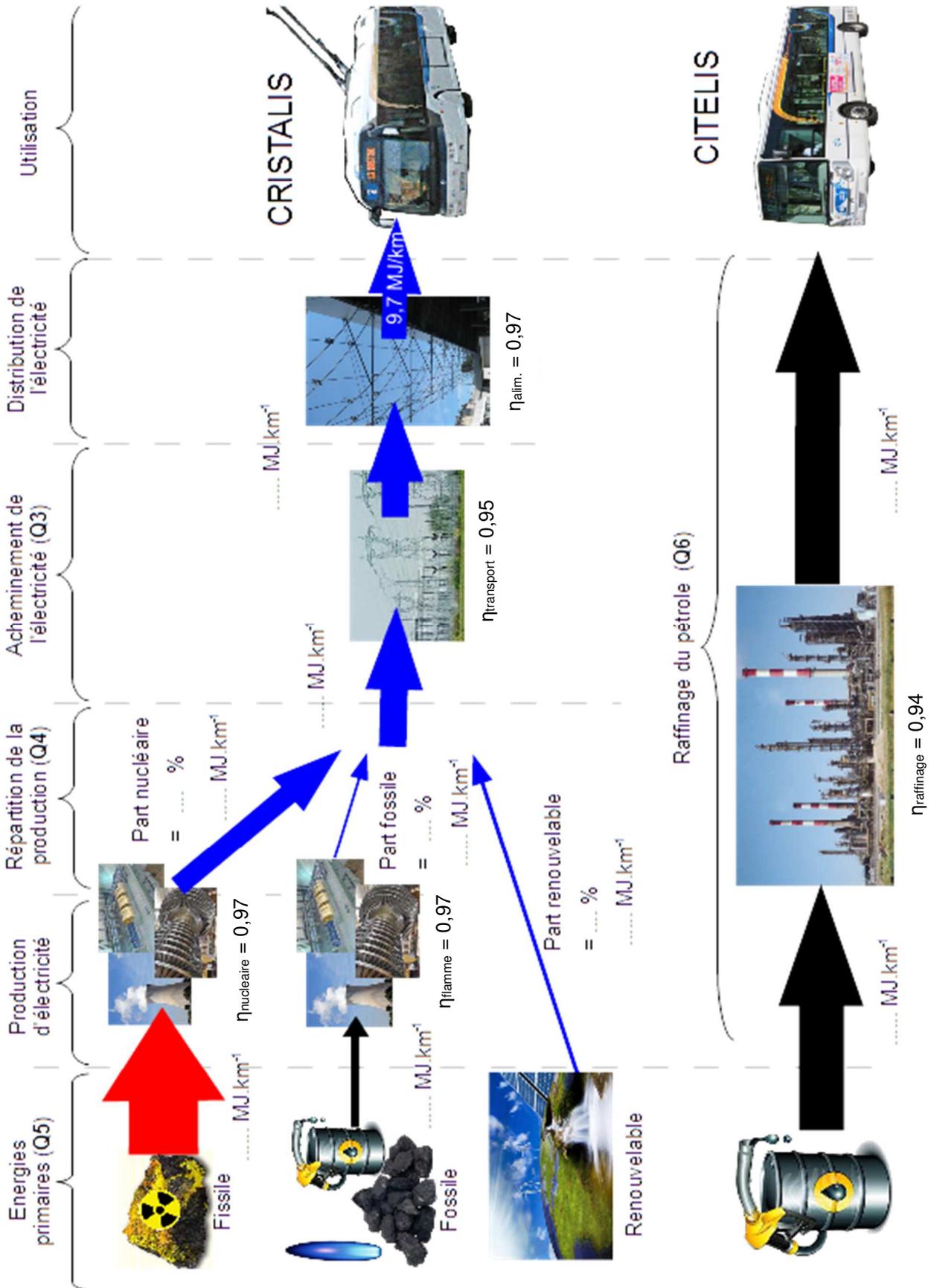
Chaîne d'alimentation électrique en toiture :



Chaîne de traction en soubassement :



Document Réponse DR1



Document Réponse DR2

