BACCALAURÉAT TECHNOLOGIQUE

ÉPREUVE D'ENSEIGNEMENT DE SPÉCIALITÉ

SESSION 2026

SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'INDUSTRIE ET DU DÉVELOPPEMENT DURABLE

Ingénierie, innovation et développement durable

ÉNERGIES ET ENVIRONNEMENT

Durée de l'épreuve : **3 heures 30**

L'usage de la calculatrice avec mode examen actif est autorisé.
L'usage de la calculatrice sans mémoire, « type collège » est autorisé.

Dès que ce sujet vous est remis, assurez-vous qu'il est complet.
Ce sujet comporte 28 pages numérotées de 1/28 à 28/28.

Constitution du sujet :

Partie commune (durée indicative 2h30)	14 points
Partie spécifique (durée indicative 1h00)	6 points

Le candidat traite les 2 parties en suivant les consignes contenues dans le sujet.
Ces 2 parties sont indépendantes et peuvent être traitées dans un ordre indifférent.

Chacune des parties est traitée sur des copies séparées.

Tous les documents réponses sont à rendre avec la copie.

PARTIE COMMUNE (14 points)

Station hydro-éolienne de l'île d'El Hierro

- Présentation de l'étude et questionnement..... pages 3 à 9
- Documents techniques ..... pages 10 à 15
- Documents réponses..... page 16

Mise en situation

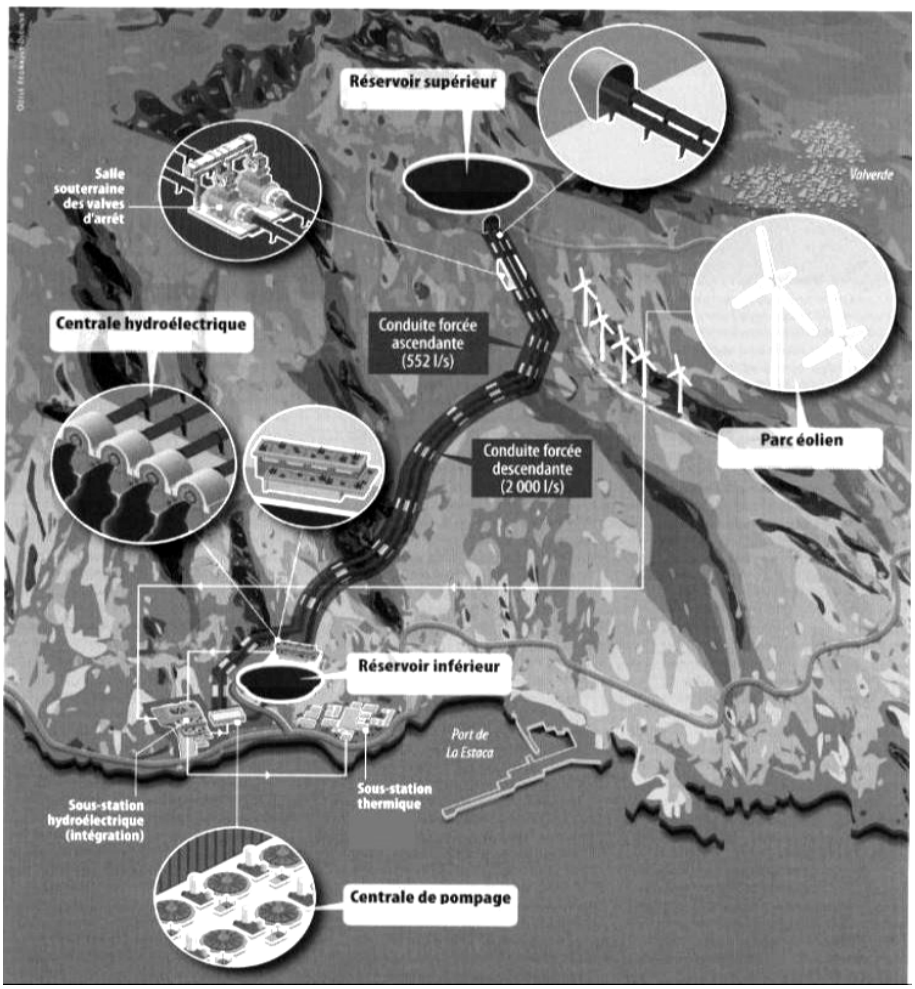
El Hierro est une île volcanique des Canaries, aux pentes abruptes et escarpées, façonnée par le vent et aux versants balayés en permanence par celui-ci. D'une surface de 278 km², elle est peuplée de 10 700 habitants et reçoit environ 2 500 touristes par mois.

Avec la profondeur des fonds sous-marins autour et même entre les îles des Canaries, El Hierro est totalement isolée d'un point de vue électrique.

La consommation annuelle de l'île est de 42 GW·h avec des appels de puissance variant de 2,5 à 7,5 MW.

Jusqu'en 2014, la production électrique était intégralement assurée par une centrale thermique fonctionnant au diesel. Depuis juin 2014, une station hydro-éolienne a été implantée pour réduire la dépendance de l'île au diesel importé.

SCHÉMA DE L'IMPLANTATION DE LA STATION HYDROÉOLIENNE D'EL HIERRO



Ce site de production d'électricité renouvelable comprend un parc éolien constitué de cinq éoliennes et une centrale hydroélectrique qui tire profit du dénivelé rapide de l'île volcanique. En effet, deux réservoirs de rétention d'eau ont été creusés pour alimenter la centrale. Le réservoir supérieur est rempli grâce à des pompes qui remontent l'eau du réservoir inférieur. C'est un système de Station de Transfert d'Energie par Pompage (STEP).

Travail demandé

Partie 1 – Pourquoi la station hydro-éolienne s'inscrit-elle dans une démarche de développement durable ?

L'objectif est de vérifier la capacité du réservoir supérieur de la station hydro-éolienne.

La station hydro-éolienne doit permettre à l'île d'El Hierro de garantir son indépendance énergétique comme présenté dans le DT1.

Question 1.1 DT1	**Identifier**, dans le diagramme des exigences de l'autonomie de la station hydro-éolienne, un argument (id 1.1 à 1.5) inscrivant l'exploitation de ce site de production d'électricité dans chacun des trois piliers du développement durable suivants : - une démarche environnementale ; - une démarche sociétale ; - une démarche économique.

Une part importante de la consommation d'électricité de l'île d'El Hierro est utilisée pour alimenter une station de dessalement de l'eau de mer.
L'eau dessalée est essentielle pour l'île, car elle permet d'assurer l'irrigation des terres agricoles. Cette eau douce est stockée dans les réservoirs, en particulier dans le réservoir supérieur auxquels sont reliés les systèmes d'irrigation de l'île.

Question 1.2 DT1, DT2	**Relever** le volume attendu pour le réservoir supérieur. **Comparer** ce volume à l'exigence en eau douce pour l'agriculture.

Lors des travaux de terrassement pour la construction du réservoir supérieur, des problématiques de terrain n'ont pas permis d'atteindre le volume initialement prévu.

Question 1.3 DT1, DT3	**Calculer** le volume réel du réservoir V_{Sup} en considérant une forme rectangulaire et une profondeur constante de 12 m. **Conclure** sur le respect de l'exigence en eau pour l'agriculture.

Partie 2 – La centrale hydroélectrique de la station répond-t-elle aux appels de puissance électrique de l'île ?

L'objectif est de vérifier si la centrale hydroélectrique peut répondre aux appels de puissance électrique de l'île.

La centrale hydroélectrique de la station est un système de station de transfert d'énergie par pompage (STEP). Le système peut fonctionner en pompage ou en turbinage.

Fonctionnement en pompage : quand la demande en électricité est inférieure à la production, la STEP utilise l'électricité excédentaire des éoliennes pour pomper de l'eau du réservoir inférieur vers le réservoir supérieur.
L'eau stockée dans le réservoir supérieur constitue ainsi une réserve d'énergie sous forme d'énergie potentielle.

Fonctionnement en turbinage : quand la demande en électricité est supérieure à la production des éoliennes, l'eau redescend du réservoir supérieur dans une conduite forcée. La STEP actionne mécaniquement une turbine qui va entraîner un alternateur. Ce fonctionnement va générer une production électrique qui pourra alimenter l'île pour pallier l'intermittence des éoliennes.

Question 2.1 DR1	**Compléter** la chaîne d'énergie de la STEP en turbinage.

L'énergie potentielle de turbinage est donnée par la formule :

$$\mathbf{W_p = m \times g \times h}$$

W_p : énergie potentielle en J (3600 J = 1 W·h)
m : masse en kg
g : accélération due à la pesanteur (g = 9,81 $m \cdot s^{-2}$)
h : hauteur de chute en m

L'énergie maximale disponible par turbinage de la STEP est limitée par le volume du plus petit des 2 réservoirs (ici le réservoir inférieur).

La masse volumique de l'eau est ρ = 1000 $kg \cdot m^{-3}$ avec $\rho = \frac{m}{V}$ et V : volume en m^3.

Question 2.2 DT2	**Déterminer** la hauteur de chute entre les 2 réservoirs. **Calculer** l'énergie potentielle maximale de turbinage W_{pmax} en MW·h.

Le rendement du turbinage est égal à 0,85.

Question 2.3	**Calculer** l'énergie électrique maximale W_{emax} produite par la STEP en MW·h.

L'énergie maximale de turbinage de la station hydro-éolienne est fixée pour la suite du travail à 230 MW·h. La consommation électrique annuelle de l'île est de 42 GW·h.

Question 2.4	**Déterminer** la consommation électrique journalière de l'île. **Comparer** cette consommation avec l'énergie maximale de turbinage.

Les appels de puissance électrique sur l'île peuvent atteindre 7,5 MW. Les turbines de la STEP doivent être capables de fournir une puissance suffisante pour répondre à ces appels.

Question 2.5 DT2	**Calculer** la puissance maximale de la STEP en turbinage. **Conclure** sur la réponse de la STEP aux appels de puissance électrique.

Partie 3 – La station hydro-éolienne permet-elle d'atteindre les objectifs fixés par les exploitants ?

L'objectif est de valider les gains environnementaux apportés par la station hydro-éolienne.

La production électrique des éoliennes pour les années 2023 et 2024 est présentée dans le DT4.

Question 3.1 DT4	**Relever** le mois de plus forte production et le mois de plus faible production pour les deux années.

Le DT5 montre le bilan de la production électrique de l'île pour l'année 2024.

Question 3.2 DT1, DT5 DR2	**Compléter** les valeurs de production sur le DR2. **Calculer** la part des énergies renouvelables dans la production totale pour les 3 périodes identifiées dans le DR2. **Conclure** sur le respect de l'exigence.

Le DT6 détaille l'intensité carbone de différents moyens de production énergétique.

Question 3.3 DT5, DT6	**Relever** les émissions de CO_2 par kW·h pour les 2 modes de production énergétique utilisés sur l'île. **Calculer** les émissions de CO_2 globale de la production électrique de l'île pour l'année 2024.

Avant l'ouverture de la station hydro-éolienne, la production électrique de l'île était uniquement assurée par la centrale thermique fonctionnant au diesel.

Question 3.4 DT1, DT6	**Calculer** les émissions de CO_2 si l'île avait uniquement utilisé la centrale diesel en 2024. **En déduire** le gain en émissions de CO_2 pour l'année 2024. **Conclure** sur le respect de l'exigence.

Partie 4 – La technologie V2G peut-elle répondre à l'accroissement de l'autonomie énergétique de l'île ?

L'objectif est de vérifier si la technologie V2G peut répondre à l'accroissement de l'autonomie énergétique de l'île de 2 à 4 jours après l'utilisation des véhicules en cycle urbain.

Une des solutions envisagées pour atteindre l'autonomie complète de l'île est la technologie V2G (Vehicle-To-Grid). Cette technologie consiste à augmenter l'énergie de stockage en connectant des véhicules électriques au réseau. Ainsi, la batterie d'une voiture électrique est envisagée comme une extension du réseau de distribution, une unité de stockage dans lequel le fournisseur d'électricité peut puiser ponctuellement.

Une étude statique sur un véhicule électrique lors d'un déplacement à vitesse constante dans le contexte de l'ile d'El Hierro est présentée dans le DT7.

Le bilan des forces au véhicule en projection sur l'axe $\vec{x}$ détermine l'expression de la force motrice nécessaire au déplacement : $F_{motrice} = F_{trainée} + F_{roulement} + P_x$

La relation entre la pente p en % et l'angle α en ° est $p = 100 \times \tan(\alpha)$.

La composante du poids projetée sur l'axe $\vec{x}$ est $P_x = m \times g \times \sin(\alpha)$.

Question 4.1	**Calculer** la composante du poids P_x pour un angle d'inclinaison correspondant à une pente de 5 %. **En déduire** la force motrice $F_{motrice}$ nécessaire au déplacement sur une pente à 5 %.

La vitesse moyenne lors des trajets domicile travail est ici estimée à 40 $km \cdot h^{-1}$. La force motrice est égale à 1 000 N.

La puissance mécanique nécessaire au déplacement peut être calculée à l'aide de la relation suivante :

P = F × V

P : puissance mécanique en W
F : force motrice en N
V : vitesse du déplacement en $m \cdot s^{-1}$

Le rendement global de l'ensemble batterie - roues est de 80 %.

Question 4.2	**Calculer** la puissance mécanique P nécessaire au déplacement. **En déduire** la puissance électrique P_e fournie au moteur.

La durée d'un trajet moyen domicile travail est estimée à 25 minutes. La puissance électrique moyenne absorbée par le moteur a été mesurée à 14 000 W lors du trajet aller.

Grâce à la récupération d'énergie en descente et en freinage, le trajet retour consomme 35 % d'énergie en moins que le trajet aller. L'énergie électrique emmagasinée du pack batteries du véhicule électrique est de 41 kW·h.

Question 4.3

Déterminer les énergies nécessaires aux trajets aller et retour, notées respectivement W_{aller} et W_{retour} en kW·h.

En déduire l'énergie restante, W_{rest} en kW·h, permettant d'alimenter le réseau électrique d'El Hierro sachant que la batterie ne doit pas se décharger au-delà de 80 % de sa capacité totale.

Le réservoir supérieur n'offre qu'une autonomie de 3 jours à la centrale hydroélectrique. L'utilisation de la technologie V2G doit accroître l'autonomie énergétique de l'île de 2 jours supplémentaires.

La consommation de puissance moyenne vaut 5,2 MW pour une population de 11 000 habitants.

Pour une voiture, l'énergie restante moyenne permettant d'alimenter le réseau électrique de l'île est estimée à 23 kW·h.

Question 4.4

Calculer l'énergie nécessaire, W_{supp} en kW·h, pour accroître l'autonomie énergétique de l'île de 2 jours supplémentaires.

En déduire le nombre de voitures nécessaires permettant de fournir l'énergie nécessaire.

Conclure sur la réponse de la technologie V2G à l'accroissement de l'autonomie énergétique de l'île d'El Hierro.

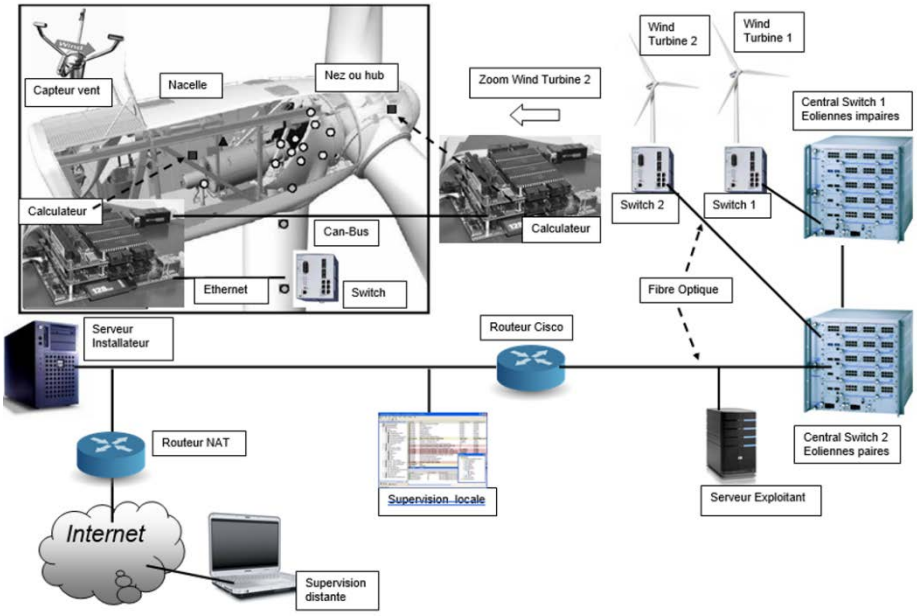
Partie 5 - Comment le système d'information permet-il la supervision du parc éolien ?

L'objectif est de valider la surveillance du parc éolien par le système d'information.

Le système d'information du parc éolien est structuré en plusieurs réseaux distincts :

- réseau installateur : c'est le réseau interne à chaque éolienne, incluant notamment la nacelle et le mât ;
- réseau exploitant : c'est le réseau intranet du parc, assurant la communication entre les différentes éoliennes et le centre de contrôle ;
- réseau de gestion : c'est le réseau d'accès externe, permettant la connexion avec des systèmes ou entités situés en dehors du parc.

Une représentation simplifiée de l'architecture du système d'information est présentée ci-dessous :



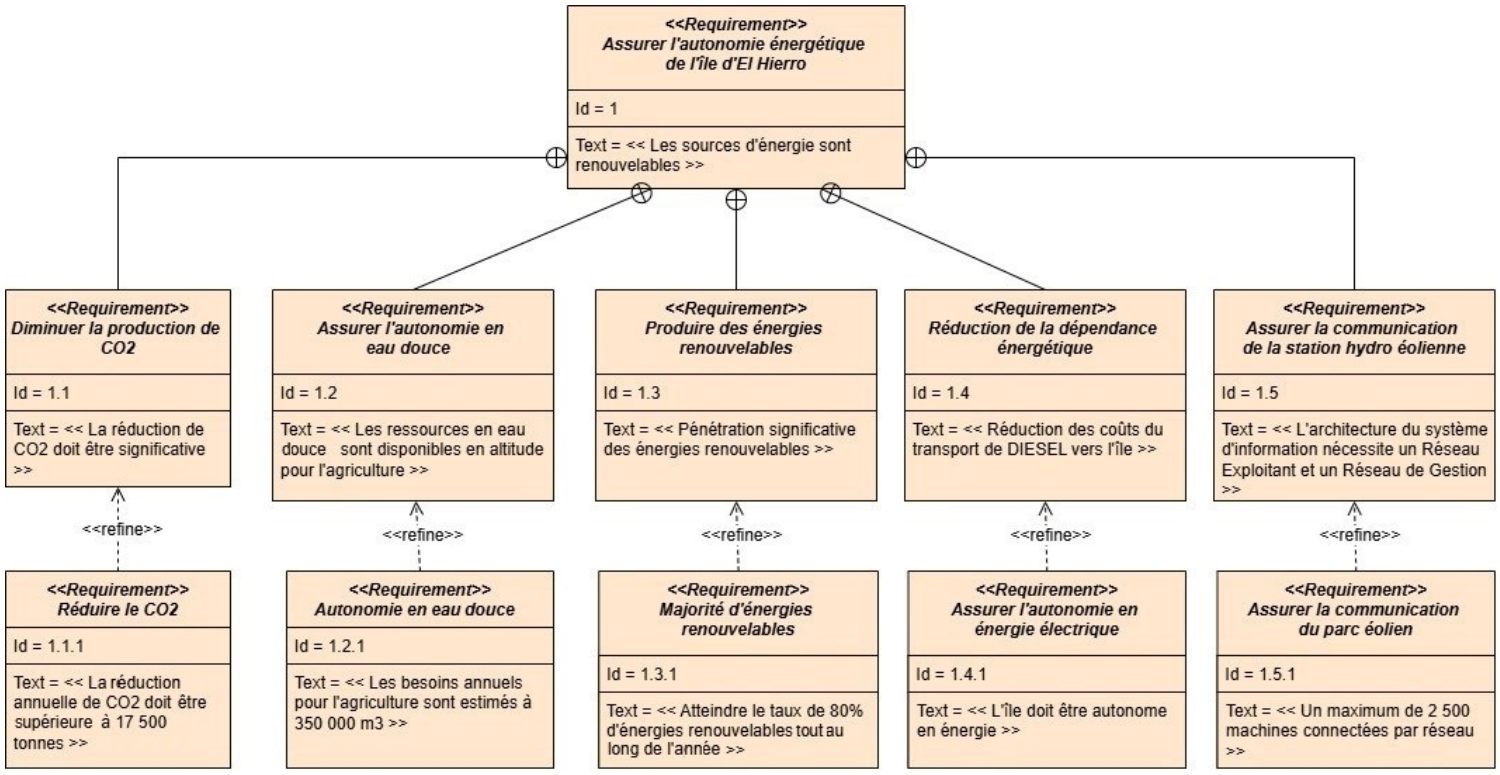
Question 5.1 DT8	**Relever** l'adresse IP de l'éolienne 5 sur le réseau exploitant.
Question 5.2 DT1	**Justifier** que le masque de sous-réseau du réseau exploitant est 255.255.240.0. **Indiquer** pour le réseau exploitant, les adresses IP suivantes : première machine ; dernière machine ; diffusion (Broadcast).
Question 5.3 DT1	**Déterminer** le nombre maximum de machines adressables sur le réseau exploitant. **Conclure** sur le respect de l'exigence.

Des capteurs de température sont utilisés pour surveiller la température des composants mécaniques de l'éolienne (génératrice, réducteur…). Un échauffement de ces composants au-dessus de 80 °C déclenche par sécurité une alerte au niveau du service de maintenance.

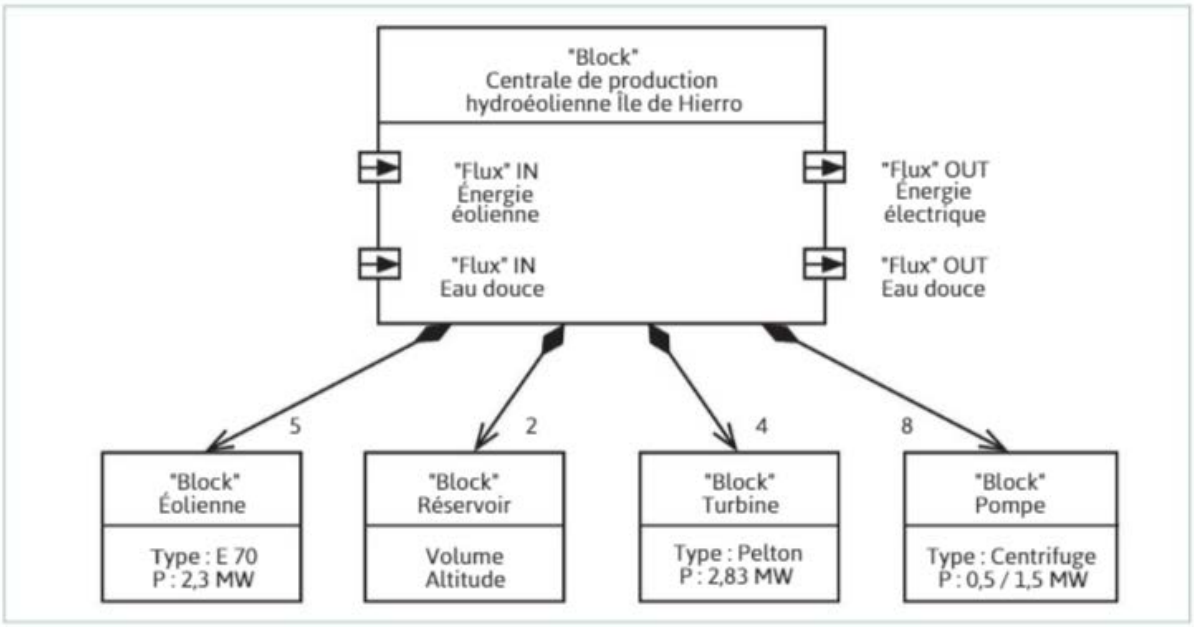
Un analyseur de trame a récupéré les données transmises par l'éolienne 5. La valeur binaire transmise pour la température du réducteur est $(01100111)_2$.

Question 5.4 DT9	**Déterminer** la valeur de cet octet en décimal. **En déduire** la température au niveau du réducteur. **Conclure** sur la présence éventuelle d'un échauffement mécanique anormal à cet instant.

DT1 – Diagramme des exigences de la station hydro-éolienne

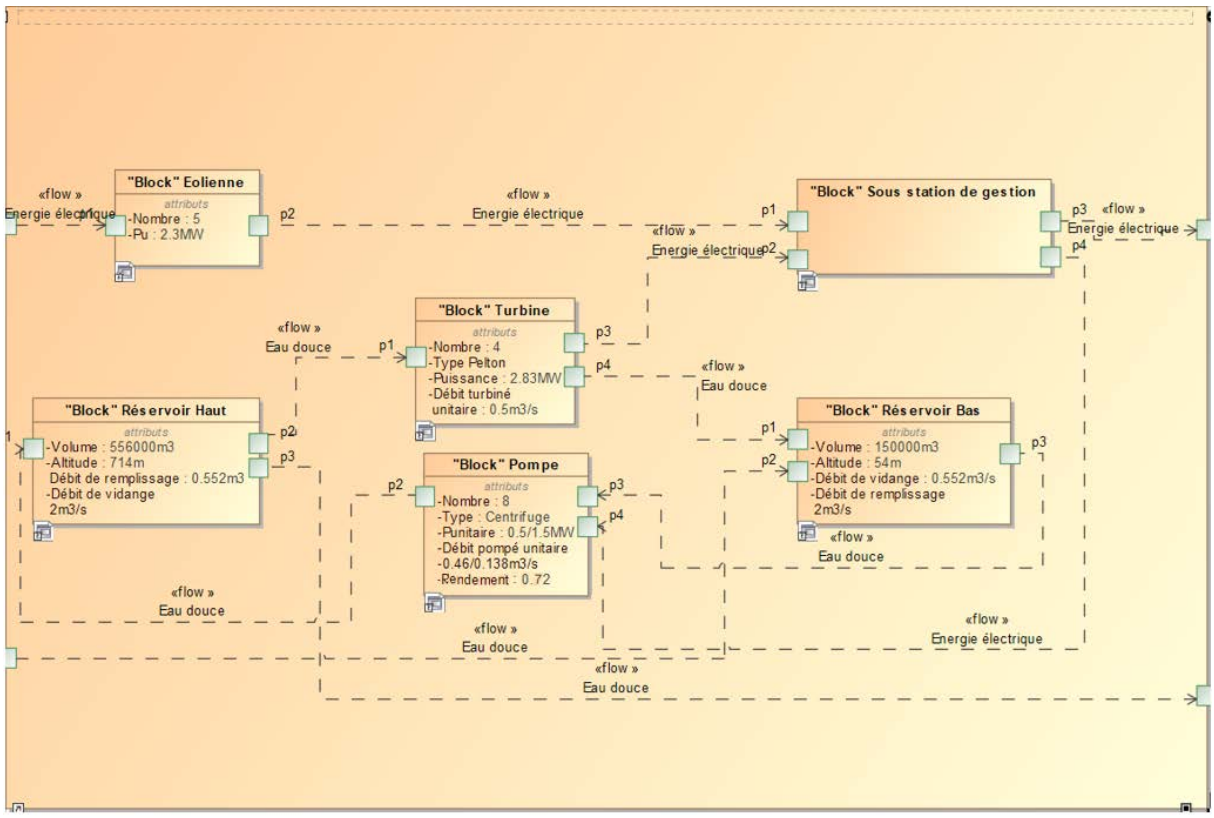


DT2 – Diagramme de définition de blocs



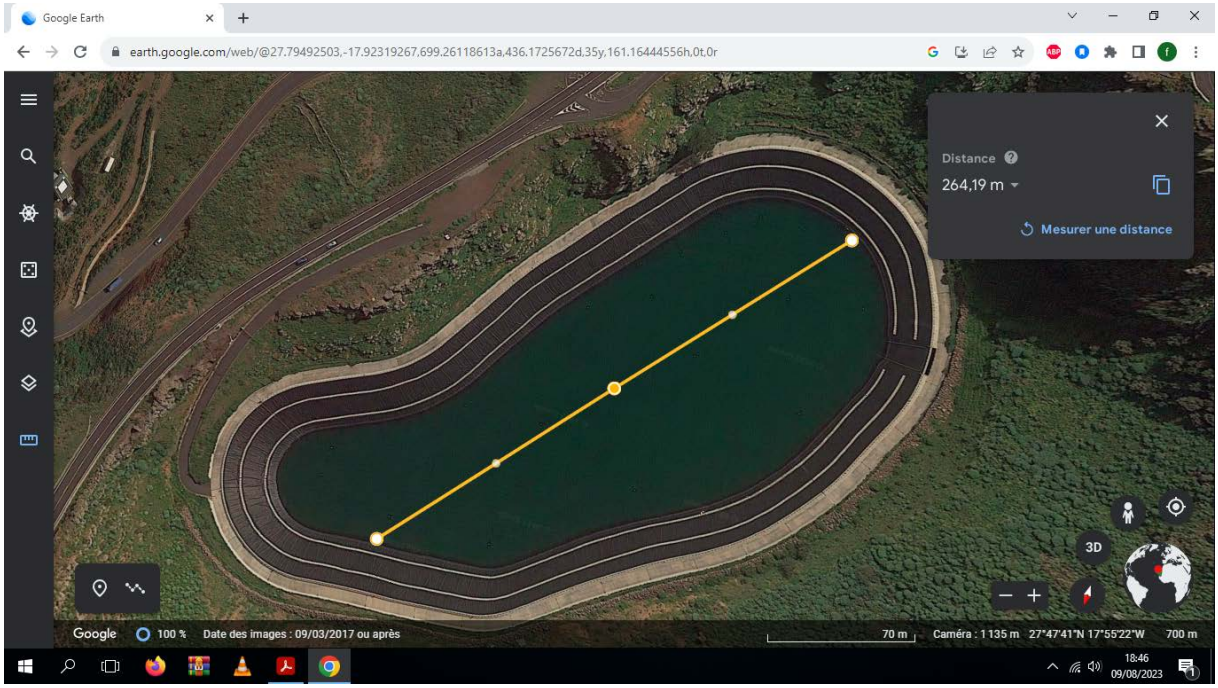
« Block » détaillé

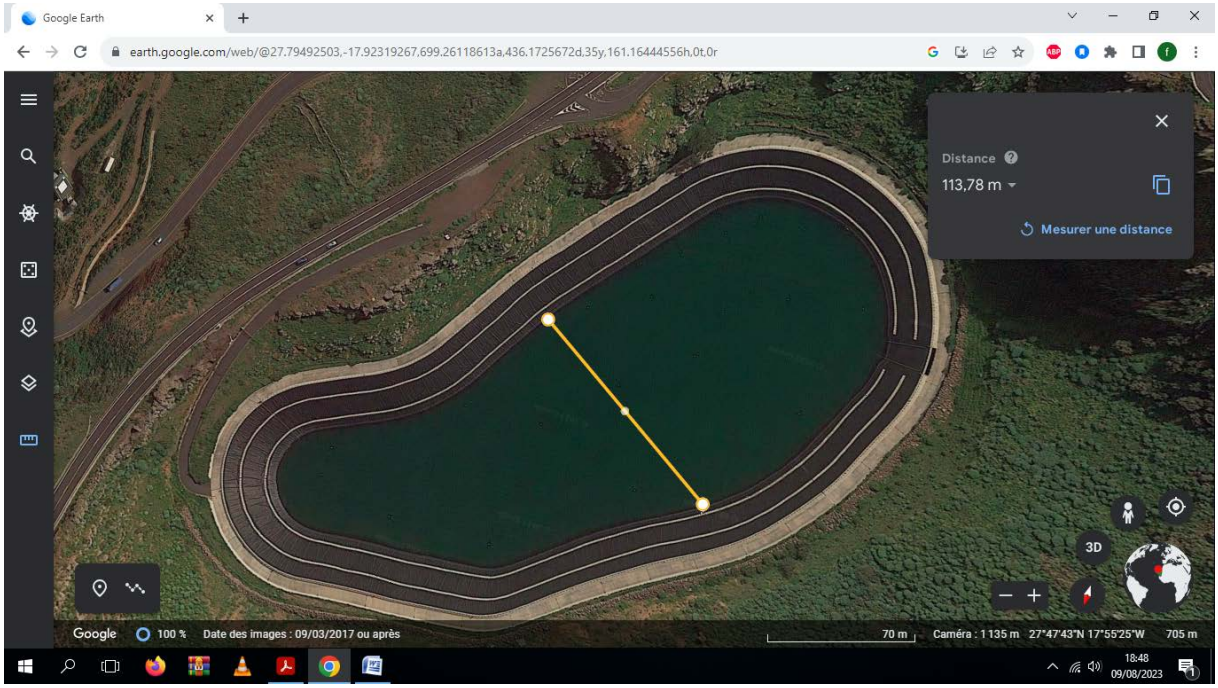
Centrale de production hydro-éolienne île d'EL HIERRO



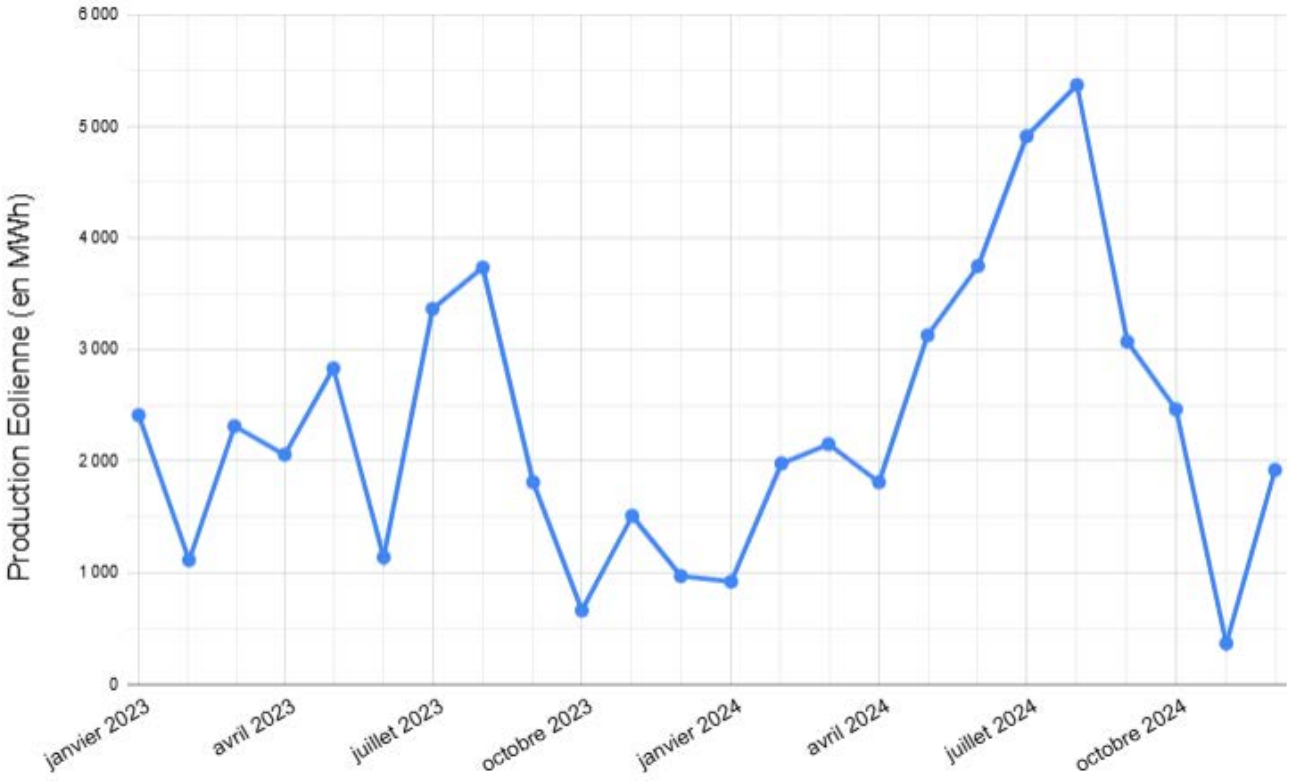
Le réservoir haut correspond au réservoir supérieur et le réservoir bas au réservoir inférieur.

DT3 – Réservoir supérieur





DT4 – Production mensuelle des éoliennes de l'île



DT5 – Bilan de la production électrique de l'île (Année 2024)

Mois	Production Electrique Totale (en MWh)	Production Centrale Diesel (en MWh)	Production Eoliennes (en MWh)
janvier 2024	4 612	3 692	920
février 2024	4 810	2 830	1 980
mars 2024	5 394	3 242	2 152
avril 2024	4 882	3 070	1 812
mai 2024	5 402	2 274	3 128
juin 2024	5 450	1 702	3 748
juillet 2024	6 119	1 208	4 911
août 2024	6 460	1 089	5 371
septembre 2024	5 466	2 395	3 071
octobre 2024	6 483	4 019	2 464
novembre 2024	4 039	3 672	367
décembre 2024	4 560	2 639	1 921
Total Année 2024	**63 677**	**31 832**	**31 845**

DT6 – Intensité carbone par mode de production

Mode de production énergétique	Intensité carbone (en g CO_2 eq par kW·h)
Biomasse	230
Charbon	1 236
Diesel	956
Eolien	13
Gaz	547
Solaire	26

DT7 – Étude statique du véhicule électrique

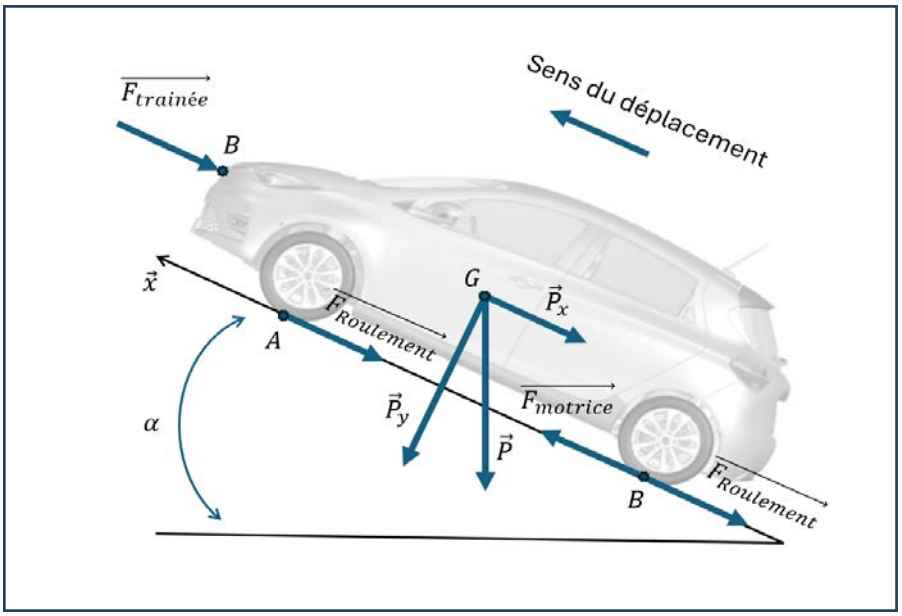
L'étude est réalisée lorsque le véhicule monte une pente de 5 % à la vitesse constante de 40 km·h^{-1}.

La masse totale du véhicule et de son pilote est m = 1500 kg.

L'accélération de la pesanteur est g = 9,81 m·s^{-2}.

La résistance totale au roulement est $F_{roulement}$ = 178 N

La résistance aérodynamique est $F_{trainée}$ = 55,5 N



DT8 – Système d'information

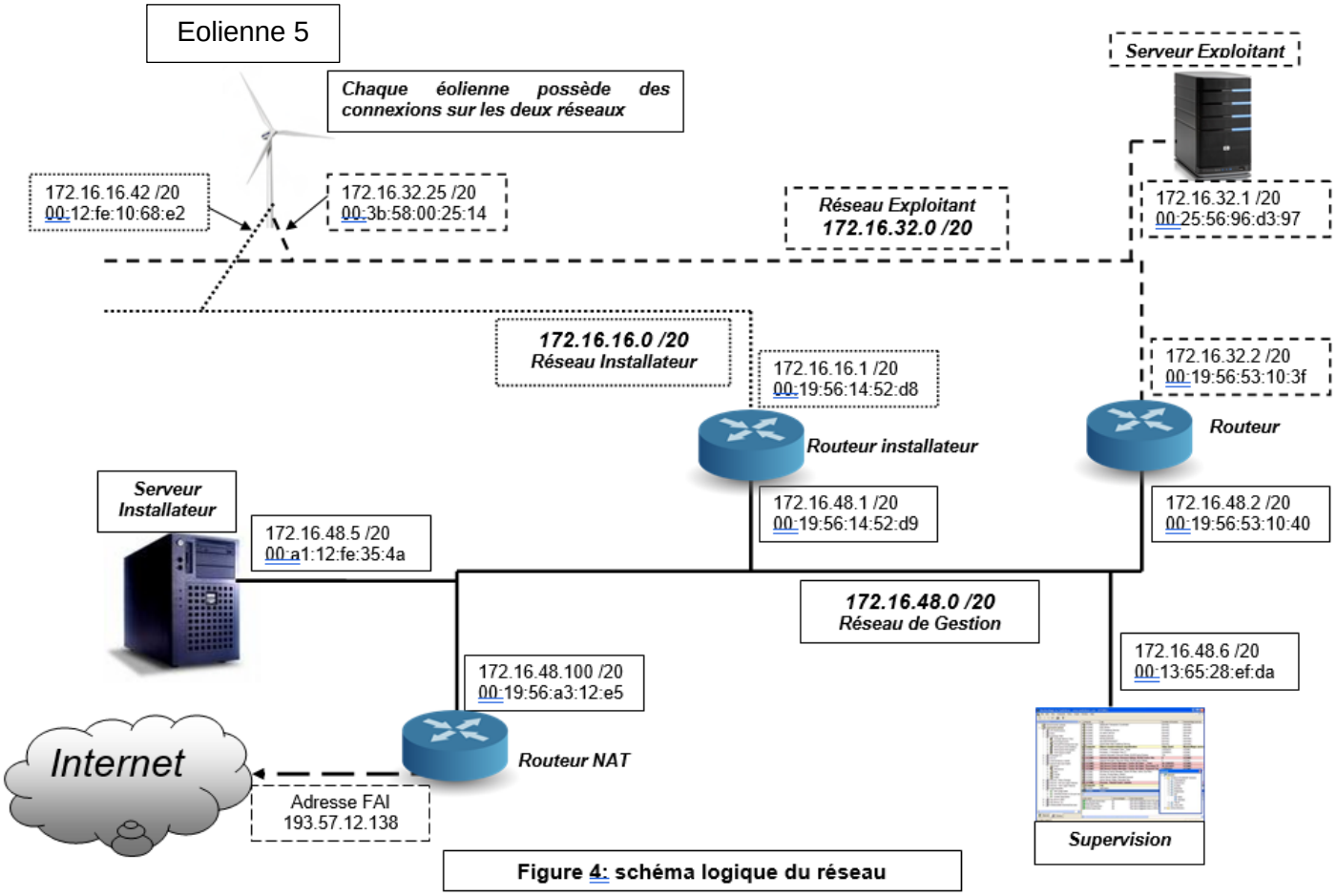
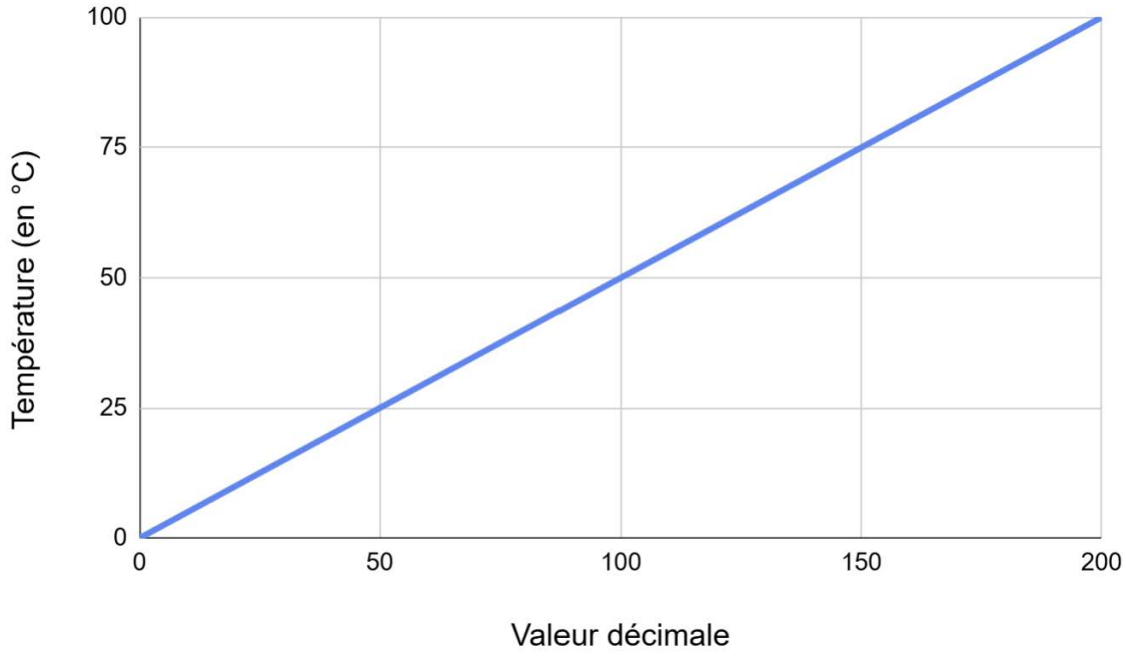
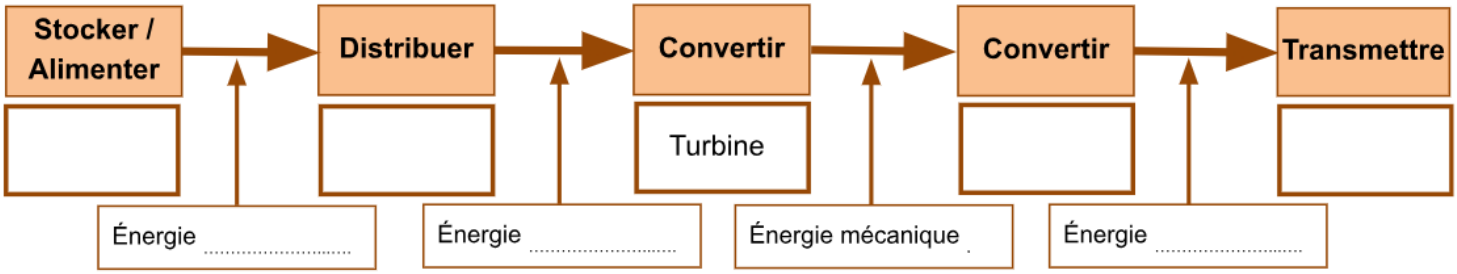


Figure 4: schéma logique du réseau

DT9 – Courbe de conversion du capteur de température



DR1 – Chaîne d'énergie de la STEP en turbinage



Constituants impliqués : conduite forcée, réseau électrique, alternateur, réservoir supérieur

Types d'énergie impliqués : électrique, hydraulique, potentielle

DR2 – Part des énergies renouvelables dans la production électrique

	Production électrique totale (MW·h)	**Production éolienne (MW·h)**	**Part des énergies renouvelables (%)**
Juillet 2024			
Décembre 2024			
Année 2024			

PARTIE SPÉCIFIQUE (6 points)

ÉNERGIES ET ENVIRONNEMENT

Station hydro-éolienne de l'île d'El Hierro

- **Présentation de l'étude et questionnement**..... pages 18 à 20
- **Documents techniques** ..... pages 21 à 23
- **Documents réponses** ..... pages 24 à 28

Mise en situation

Les solutions technologiques de la station hydro-éolienne de l'ile d'El Hierro sont :
- le parc éolien ;
- la centrale hydroélectrique qui tire profit du dénivelé rapide de l'île volcanique. En effet, deux bassins de rétention d'eau ont été creusés : le réservoir amont est rempli grâce à des pompes qui remontent l'eau de l'aval. C'est un système de Station de transfert d'énergie par pompage ;
- le véhicule-réseau (V2G), un concept d'exploitation des véhicules électriques à prise dédié à l'équilibre du réseau électrique. Grâce à la réversibilité des batteries, ces véhicules peuvent stocker de l'énergie temporairement et la restituer au réseau lorsque cela est nécessaire. La récupération d'énergie s'effectue lors des phases de décélération rapide ou de descente, en fonction du profil de la route.

Travail demandé

Partie A – Comment valider les solutions techniques en turbinage et en pompage de la centrale hydroélectrique ?

L'objectif est de valider les solutions techniques en turbinage et en pompage à partir des technologies des turbines et des pompes ainsi que des puissances installées, adaptées à l'offre/demande de l'île.

La hauteur de la conduite forcée séparant les réservoirs supérieur et inférieur (hauteur de chute ou hauteur de refoulement) est estimée à 660 m.

Question A.1 DTS1 DRS1	À l'aide du DTS1, **relever** le débit turbiné unitaire Q_t et la puissance installée unitaire P. À l'aide d'un tracé**, identifier,** dans le DRS1, la technologie de la turbine.
Question A.2 DTS1 DRS1	**Relever** le nombre de turbines installées et **vérifier** que la centrale hydroélectrique répond bien à une demande de puissance électrique pouvant aller jusqu'à 7,5 MW.
Question A.3 DTS1 DRS2	**Relever** les débits pompés unitaires Qp_{min} et Qp_{max} en $m^3 \cdot s^{-1}$. À l'aide d'un tracé**, identifier,** dans le DRS2, la technologie de la pompe.

La production éolienne 11,5 MW est aujourd'hui injectée à hauteur de 60 % directement sur le réseau, le solde (40 %) faisant fonctionner les pompes. Le but est de consommer directement le plus d'électricité éolienne possible. Pour cela, les autorités locales ont développé une approche globale de l'équilibre offre/demande.

La centrale hydroélectrique possède huit pompes (6 × 500 kW et 2 × 1 500 kW) qui remontent l'eau du bassin aval vers le bassin amont.

Question A.4 | **Calculer** la puissance électrique éolienne Pe en MW nécessaire pour faire fonctionner les pompes.

Question A.5 | **Calculer** la puissance des huit pompes centrifuges.

DTS1 | À l'aide du DTS1, **relever** le rendement η moteur pompe.

Vérifier que le solde de la puissance électrique éolienne est suffisant pour alimenter les huit pompes.

Partie B – Comment caractériser la réversibilité de la chaîne de puissance d'un véhicule électrique lors d'un trajet urbain tout en évitant une décharge profonde de sa batterie ?

L'objectif est de caractériser la réversibilité de la chaîne de puissance d'un véhicule électrique en mouvement à partir du comportement du véhicule électrique lors d'un trajet urbain par simulation tout en s'assurant que la batterie ne subisse pas une décharge trop importante, ce qui pourrait nuire à sa durée de vie.

La chaîne de puissance du véhicule électrique est une association de composants réalisant les fonctions techniques d'alimentation en énergie, de conversion d'énergie, d'adaptation d'énergie et de modulation d'énergie.

Question B.1 | Dans la chaîne de puissance, **indiquer** la fonction technique puis **préciser** entre parenthèses le nom du composant correspondant.

DRS3 | À l'aide des propositions ci-après, **nommer** les puissances impliquées de cette chaîne lors du déplacement du véhicule : puissance mécanique de rotation, puissance de mécanique de rotation adaptée, puissance électrique, puissance électrique modulée

Question B.2 | **Identifier** les grandeurs effort et flux pour caractériser les puissances impliquées de cette chaîne lors du déplacement du véhicule.

DRS3

Question B.3 DTS2	**Relever** les deux pics d'intensité I_{bat} en A ainsi que leurs instants d'apparition t en s. **Nommer** la phase du mouvement du véhicule qui provoque ces pics d'intensité.

Pour respecter la profondeur de décharge DoD d'une batterie, il ne faut pas dépasser 80 % du taux de décharge.

Question B.4	**Estimer** le taux de décharge en % à la suite d'un trajet urbain.
DTS2	**Calculer** le nombre maximal de trajets urbains que peut effectuer le véhicule tout en respectant la profondeur de décharge DoD maximale de la batterie.

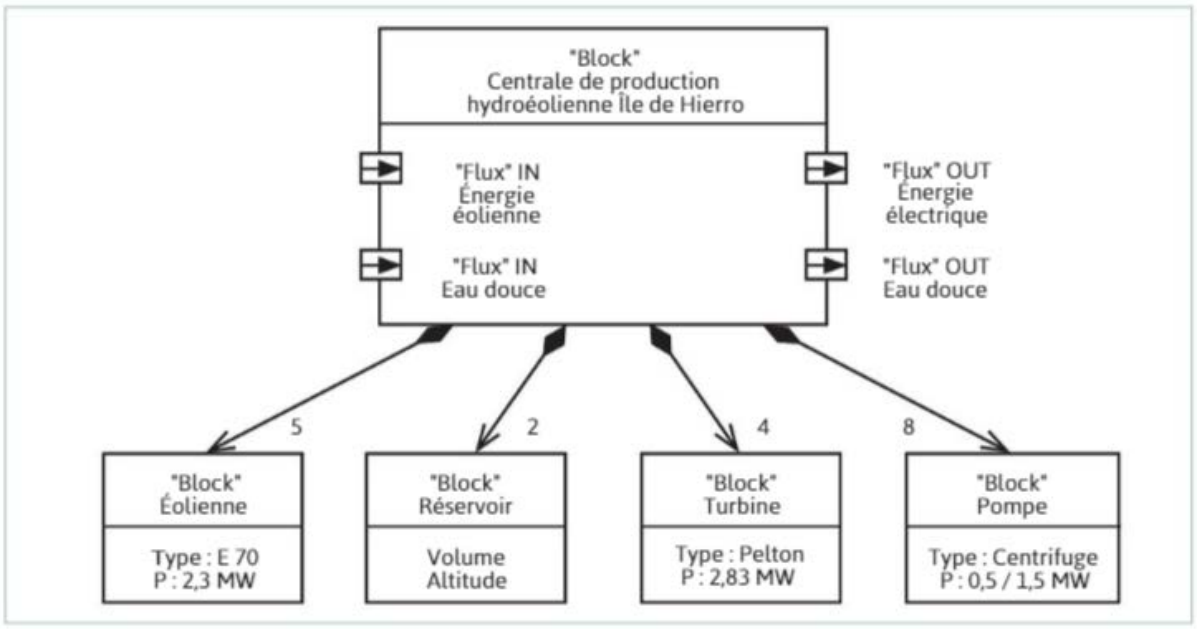
La décharge et la recharge de la batterie sont réalisées dans des phases du mouvement du véhicule. C'est le principe de réversibilité de la chaîne de puissance du véhicule qui permet cette recharge.

Question B.5 DTS2 DRS4	À l'aide du DTS2, **compléter** le tableau avec les fréquences de rotation du moteur N en $tr \cdot min^{-1}$ pour les 7 points correspondant à des instants spécifiques du cycle d'utilisation. **Calculer** les vitesses Ω en $rad \cdot s^{-1}$ ainsi que les puissances $P_{méca}$ en kW et **reporter** vos valeurs sur le DRS4.

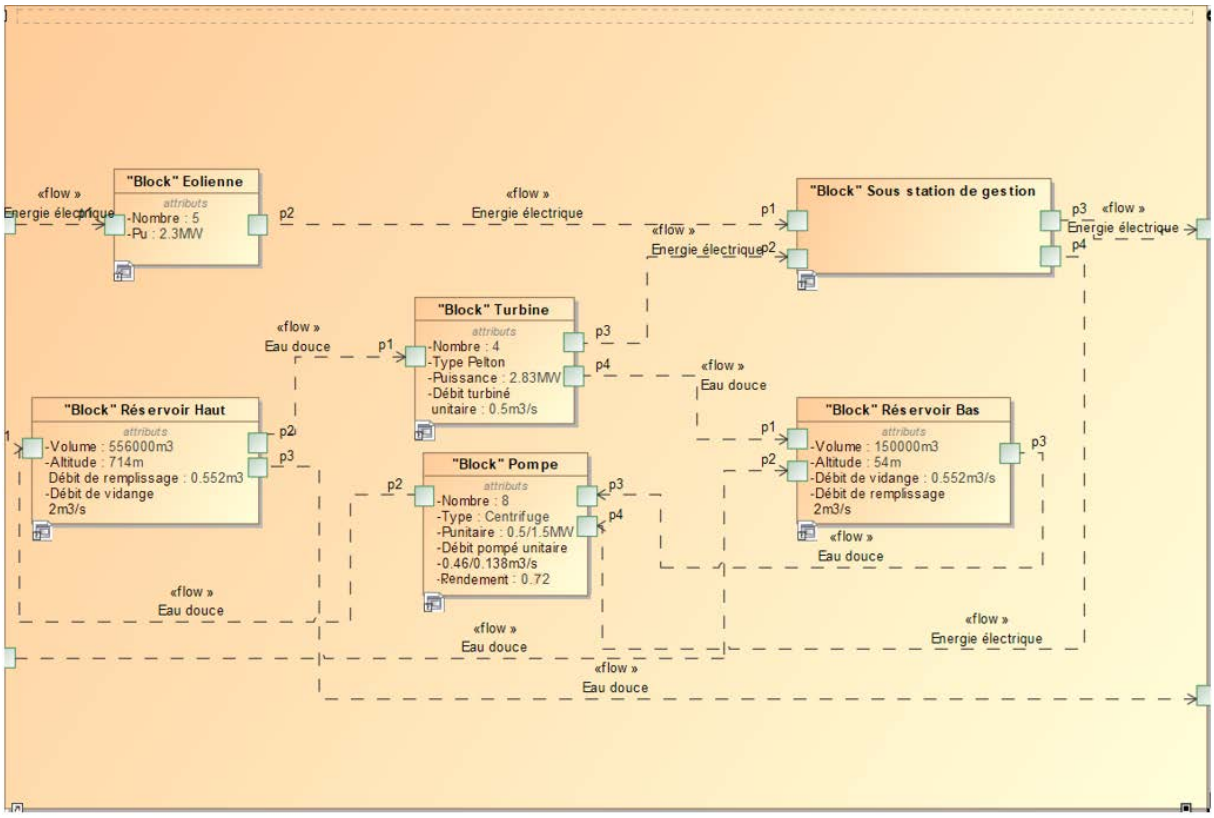
Question B.6 DTS2, DTS3 DRS4	**Placer** dans le plan mécanique Ω = f(C), les points de fonctionnement restant comme cela a été fait pour les 2 points positionnés. **Déduire** les quadrants de la motorisation électrique.

Question B.7 DRS5	**Nommer** la phase du mouvement du véhicule qui provoque le fonctionnement en générateur de la motorisation et la recharge de la batterie. **Conclure** graphiquement sur l'état de la batterie et le mode de fonctionnement de la motorisation en suivant les indications ci-dessous : - la recharge de la batterie par un trait vert ; - la décharge de la batterie par un trait rouge ; - le fonctionnement en moteur de la motorisation par un trait rouge ; - le fonctionnement en générateur de la motorisation par un trait vert.

DTS1 - Diagramme de définition des blocs



« Block » Centrale de production hydro-éolienne île d'EL HIERRO

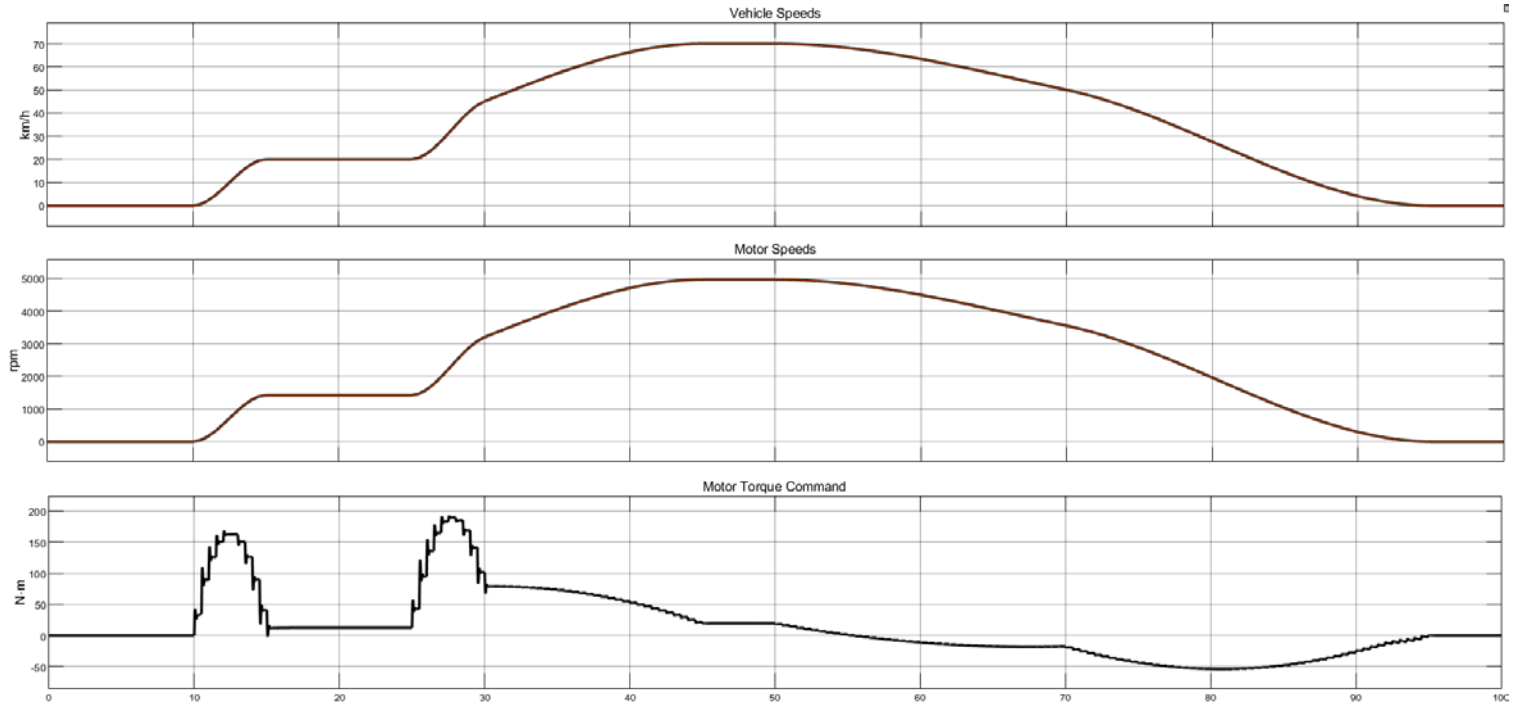


Le débit pompé unitaire est exprimé sous la forme débit max / débit min

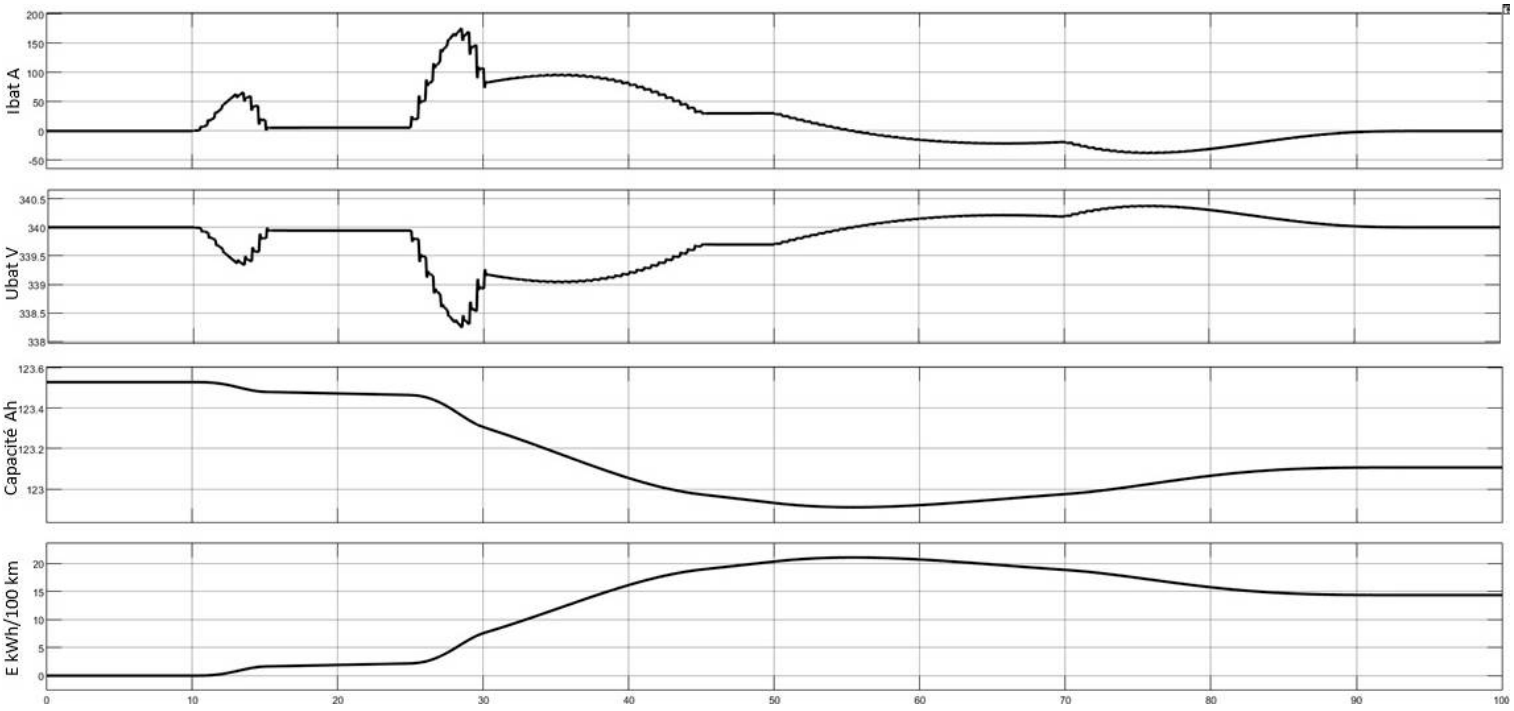
DTS2 – Comportements du véhicule électrique lors d'un trajet urbain par simulation

Le trajet urbain de 100 s comprend : une phase initiale d'arrêt durant 10 s ; une 1ère accélération à t = 10 s ; une 2ème accélération à t = 25 s ; une phase à vitesse établie à t = 45 s ; une décélération à t = 50 s et un arrêt à t = 93 s.

Comportement mécanique du véhicule électrique lors du trajet urbain de 100 s

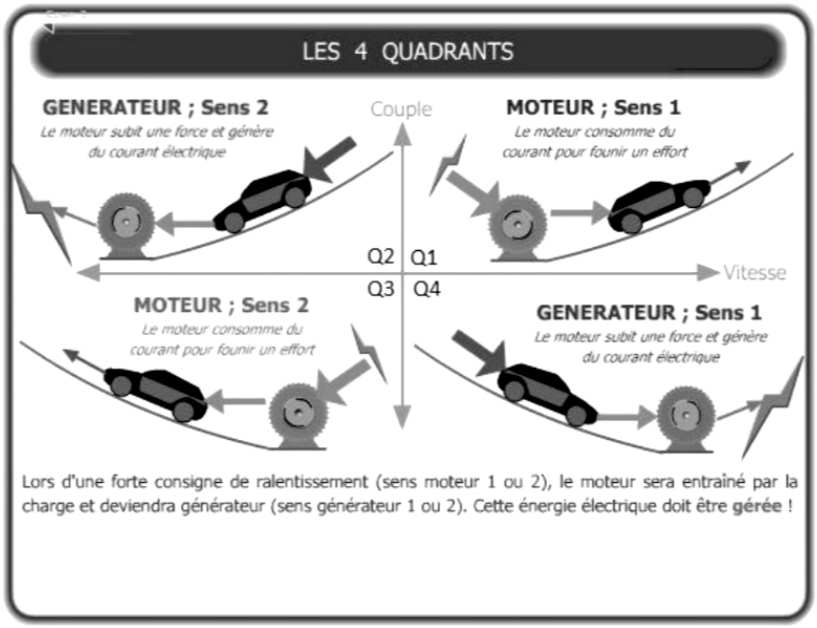


Comportement électrique du véhicule électrique lors du trajet urbain de 100 s

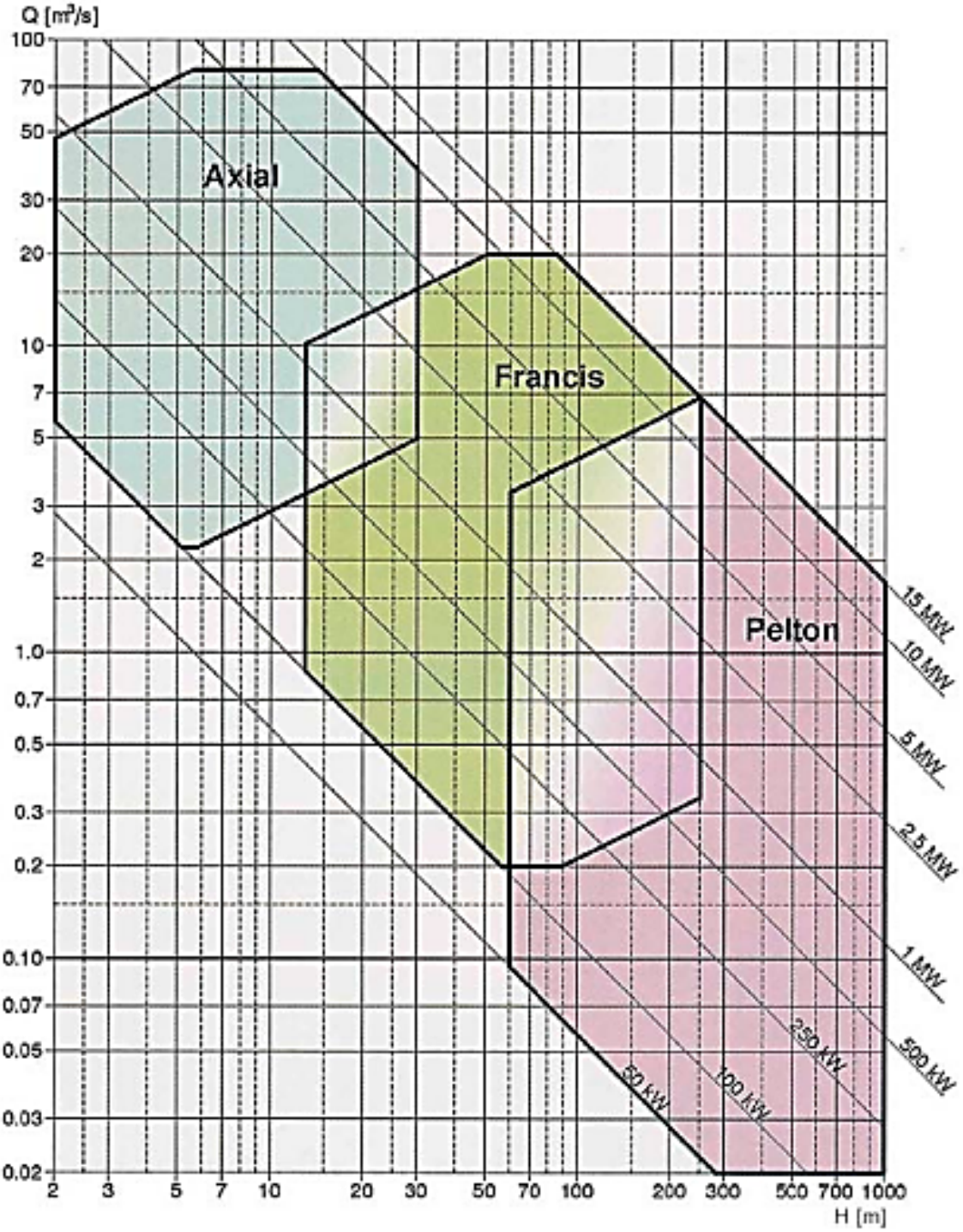


DTS3 – Quadrants de la motorisation électrique

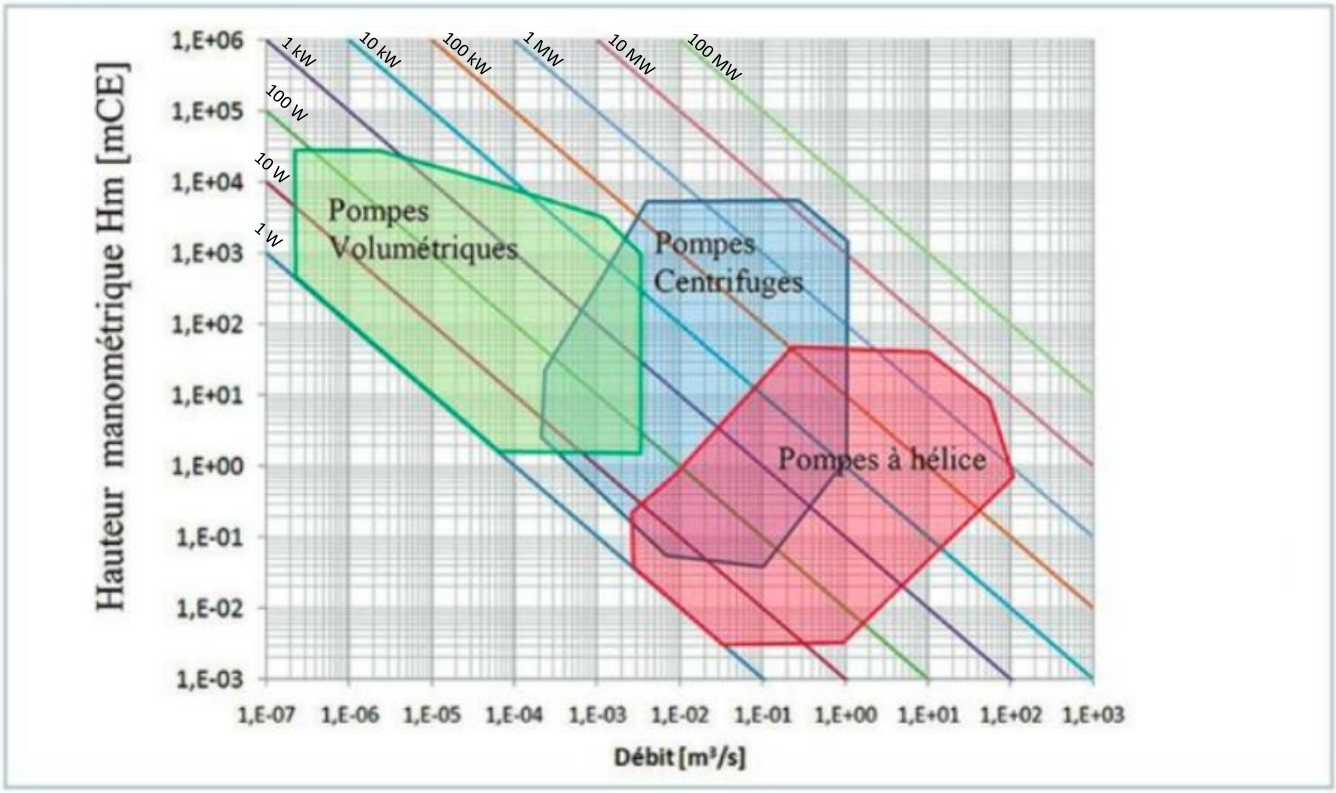
L'illustration ci-dessous représente les 4 quadrants (Q1 à Q4) ainsi que les modes de fonctionnement de la motorisation électrique (moteur, générateur) du point de vue mécanique (couple, vitesse).

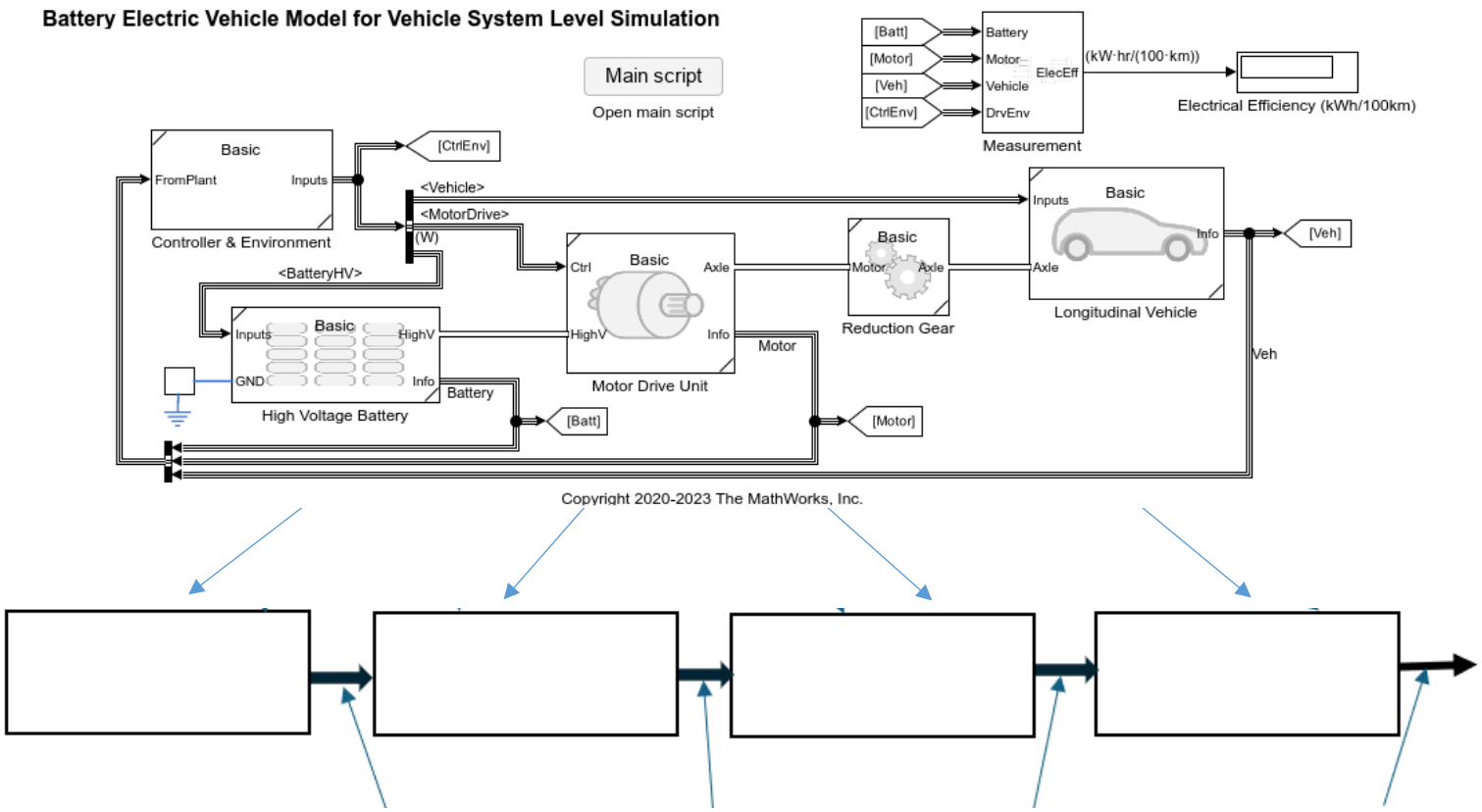


DRS1 – Technologie et puissance des turbines



DRS2 – Technologie et puissance des pompes

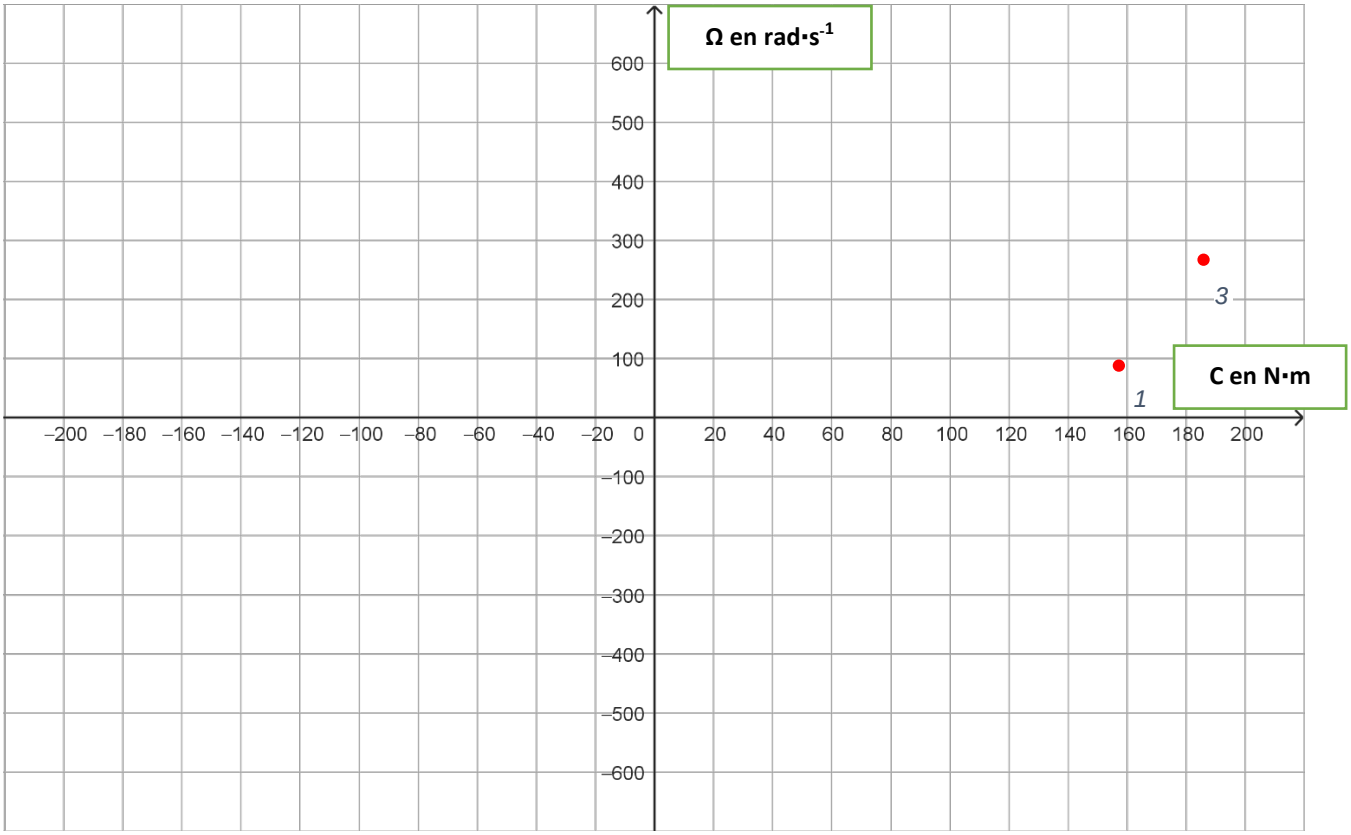
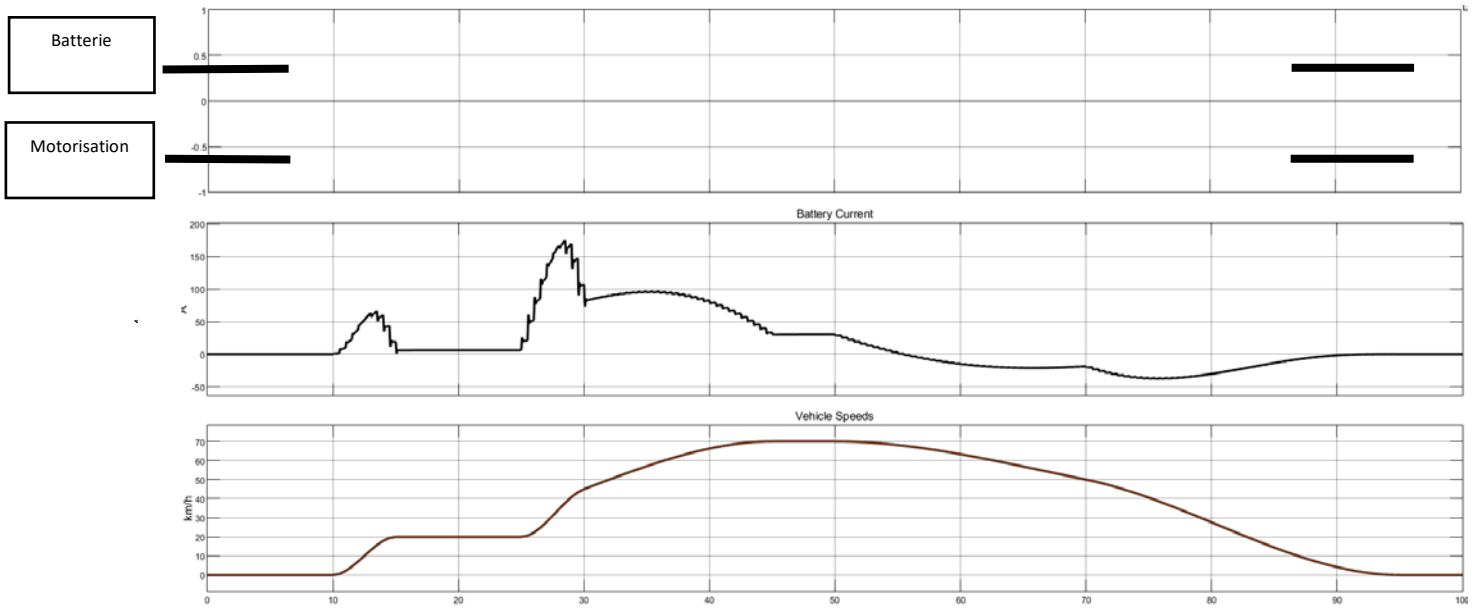




Forme de puissance				
Grandeur Effort				
Grandeur Flux				

DRS4 – Caractéristiques mécaniques d'un cycle urbain

Point de fonctionnement	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Temps (s)	0	12,5	20	28	30	45	55	70	80
Couple C (N·m)	0	162	12,5	190	78	19	0	- 17	- 54
Vitesse N ($tr \cdot min^{-1}$)		800		2 300					
Vitesse Ω ($rad \cdot s^{-1}$)		83		240					
Puissance $P_{méca}$ (kW)		13,4		45,6					
Signe de $P_{méca}$		+		+					



DRS5 – États de la batterie / Modes de fonctionnement de la motorisation