

La motorisation d'un véhicule hybride (seconde

HERVÉ DISCOURS^[1]

Plus avantageuse que les solutions série ou parallèle, l'architecture de motorisation parallèle-série équipe plusieurs véhicules hybrides du marché grand public. Plutôt que par une approche descriptive classique, cette étude présente sous forme d'exercice le fonctionnement de ce type de motorisation, ce qui permet une découverte active et progressive des principes mis en jeu. À l'origine destinée à des étudiants post-BTS en formation de technicien dans le secteur automobile, elle montre bien l'aspect pluritechnologique qui caractérisera les motorisations des véhicules de demain.

Cette seconde partie s'attache aux différentes phases de fonctionnement du groupe motopropulseur, constituant ainsi une synthèse complète du fonctionnement global de la machine.

Le fonctionnement global

Parmi les très nombreux modes de fonctionnement du système hybride, quelques situations classiques vont maintenant être étudiées au travers d'exemples concrets. Ces situations mettent en évidence la stratégie de commande des différentes machines, illustrée par le diagramme 1.

L'étude sera menée après les premières minutes de fonctionnement, pendant lesquelles est réalisé le préchauffage du moteur essence. Durant cette phase, la stratégie de commande du système est alors légèrement différente du fonctionnement normal (l'objectif est d'améliorer les performances vis-à-vis des émissions, notamment lors d'un démarrage à froid).

mots-clés

conversion, énergie, puissance

La situation n° 1

La voiture roule à 40 km/h sur le plat, le conducteur appuie sur la pédale d'accélérateur. Cet appui correspond à une demande de puissance d'entraînement de 10 243 W. L'état de charge de la batterie est plutôt bas, le contrôleur batterie demande une puissance de 5 000 W (charge).

Sur le document en annexe 1 :

- Reporter les valeurs de V_V , P_T et P_{BATT} .
- Calculer et reporter les valeurs de N_{MG2} et C_T .
- Calculer et reporter la valeur de P_{ICE} .
- Déterminer le point de fonctionnement d'ICE, pour réduire au maximum la consommation du

moteur. En déduire les valeurs de C_{ICE} et N_{ICE} , à reporter sur la figure.

- Calculer et reporter les valeurs de C_{MG1} et C_S .
- Calculer et reporter la valeur de C_{MG2} .
- Calculer et reporter la valeur de N_{MG1} .
- Montrer les sens de rotation des éléments du PSD.

Vérification et transferts d'énergie

Calculer et reporter les valeurs de P_{MG1} et P_{MG2} sur le document en annexe 1.

Vérifier que MG1 et MG2 permettent la charge de la batterie, à la valeur désirée.

$$P_{BATT} = P_{MG1} - P_{MG2} = 5\,237 - 237 = 5\,000 \text{ W}$$

C'est ce que demandait le contrôleur batterie.

À partir de P_{MG1} , calculer et reporter la valeur de I_1 .

À partir de P_{MG2} , calculer et reporter la valeur de I_2 .

À partir de P_{BATT} , calculer et reporter la valeur de I .

Les valeurs des courants ont été déterminées dans la première partie de l'article.

$$P_{MG1} = 5\,237 \text{ W} \Rightarrow I_1 = 5\,237 / 285 = 18,37 \text{ A}$$

$$P_{MG2} = 237 \text{ W} \Rightarrow I_2 = 237 / 285 = 0,83 \text{ A}$$

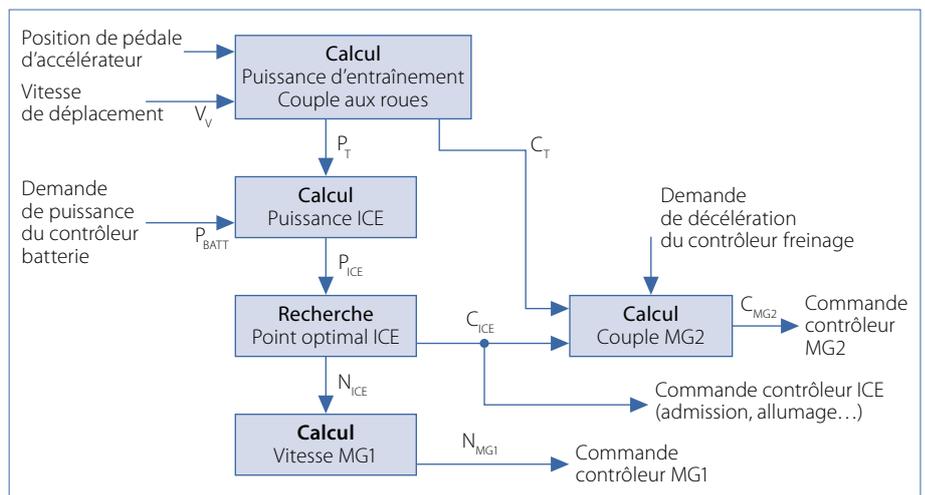
$$P_{BATT} = P_{MG1} - P_{MG2} = 5\,000 \text{ W} \Rightarrow I = 5\,000 / 285 = 17,54 \text{ A}$$

$$\text{Vérification: } I_1 = I + I_2 \Rightarrow 18,37 = 17,54 + 0,83$$

MG1 est générateur, la batterie se charge et MG2 est moteur.

Vérifier la loi des nœuds sur le circuit électrique.

$$I + I_2 = 17,54 + 0,83 = 18,37 = I_1$$



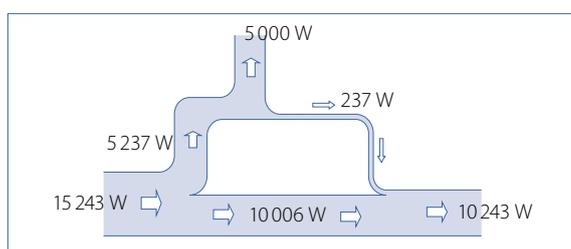
1 Le diagramme de stratégie de commande du groupe motopropulseur

[1] Professeur agrégé de génie électrique au lycée Jules-Ferry de Versailles (78).

partie)

Représenter par des flèches le sens de circulation des énergies dans le système.

ICE est en service, MG1 générateur, MG2 moteur, et la batterie se charge. Le sens de circulation des énergies est donné sur le schéma 2.



2 La circulation des énergies en situation n° 1 ramenée sous forme de puissance

Exprimer en pourcentage l'apport de MG2 dans la propulsion de la voiture. Comment pourrait-on augmenter cet apport et quelle en serait la conséquence ?

La proportion est de $237 / 10\,243$, soit $\approx 2,3\%$ pour l'apport de MG2 dans la propulsion de la voiture. Si l'on augmentait N_{ICE} , cette proportion augmenterait également, mais le rendement du moteur serait moins bon, et, donc, la consommation supérieure.

La situation n° 2

La voiture roule maintenant à une vitesse constante de 110 km/h sur le plat, ce qui correspond à une puissance d'entraînement de 19 052 W. Le contrôleur batterie demande toujours une charge, avec $P_{BATT} = 5\,000$ W.

Étudier le comportement du système et compléter le document de l'annexe 2.

ICE est en service, MG2 générateur, MG1 moteur, et la batterie se charge. Le sens de circulation des énergies est donné sur le schéma 3.

La situation n° 3

La voiture roule maintenant à une vitesse constante de 80 km/h sur le plat, ce qui correspond à une puissance d'entraînement de 9 340 W. L'état de charge de la batterie est suffisant, le contrôleur batterie ne demande pas de charge.

Le moteur essence peut-il être arrêté ? Justifier.

À 80 km/h, un arrêt de la rotation d'ICE engendrerait une survitesse sur MG1. Une propulsion uniquement électrique est donc impossible (il a déjà été démontré que celle-ci ne pouvait intervenir qu'en dessous de 68 km/h).

Rappels

Le support de l'étude

Au sens large, l'appellation « véhicule hybride » désigne un véhicule dont le système de traction utilise plusieurs sources d'énergie. L'hybridation vise généralement à combiner deux modes de traction distincts, afin de réduire la consommation de carburant et par conséquent les émissions de polluants.

La voiture étudiée est un véhicule hybride parallèle-série, aussi appelé hybride parallèle à dérivation de puissance.

Inspirée du modèle Prius THS de Toyota, cette étude en reprend la structure du GMP (Groupe MotoPropulseur) et les principales données numériques. Du fait de la complexité du système, certaines hypothèses simplificatrices ont dû être prises et se traduisent par de minimes modifications dans les grandeurs. L'étude reste cependant fidèle au principe de fonctionnement original.

Les objectifs de l'étude

Les objectifs de l'exercice proposé au travers des deux parties de l'article sont les suivants :

- Étudier les réversibilités électromécaniques de plusieurs machines fonctionnant en association.
- Étudier les transferts d'énergie lors de différentes situations de fonctionnement du véhicule.
- Montrer l'influence de la stratégie de commande sur la consommation de carburant.

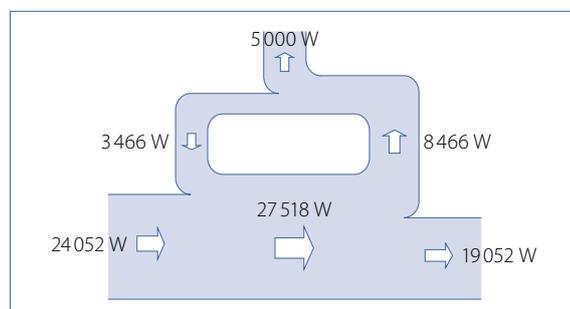
Les abréviations utilisées

ICE (Internal Combustion Engine) : moteur essence

MG (Moteur Générateur) : machines électriques

CVS : convertisseurs électroniques associés aux machines électriques

PSD (Power Split Device) : répartiteur mécanique de puissance

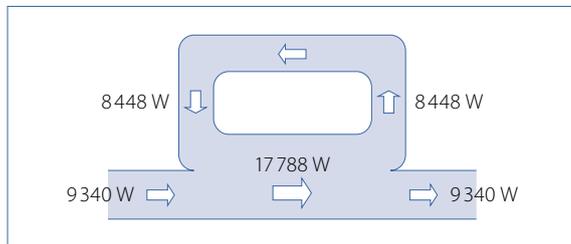


3 La circulation des énergies en situation n° 2 ramenée sous forme de puissance

Une aide de la batterie (décharge) ne serait pas intéressante, puisque le soulagement d'ICE engendrerait son fonctionnement à faible charge et donc une détérioration de son rendement.

Étudier le comportement du système et compléter le document de l'annexe 3.

ICE est en service, MG2 générateur, MG1 moteur, et la batterie au repos. Le sens de circulation des énergies est donné sur le schéma 4.



4 La circulation des énergies en situation n° 3 ramenée sous forme de puissance

La réduction de N_{MG1} réduit la puissance dans la « boucle de dérivation », mais détériore le rendement du moteur essence. En tenant compte du rendement des machines électriques et de leurs convertisseurs, on fait apparaître les pertes dans la boucle de dérivation. Pour que l'ensemble soit optimisé, il faut que l'augmentation de N_{MG1} provoque une réduction des pertes dans ICE supérieure à l'augmentation des pertes dans la boucle électromécanique. Question de compromis...

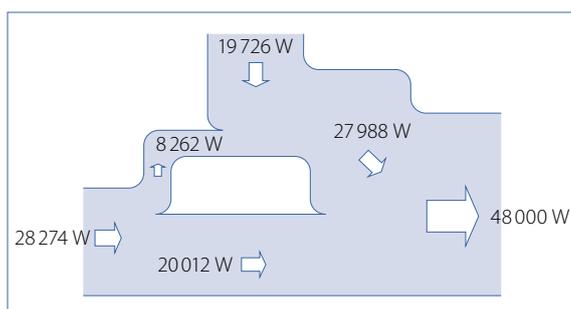
La situation n° 4

La voiture roule toujours à 80 km/h, mais la route est en pente montante et le conducteur souhaite réaliser un dépassement. En appuyant sur la pédale d'accélérateur, cette demande se traduit par une puissance d'entraînement de 48 kW. L'état de charge de la batterie est satisfaisant.

Étudier le comportement du système et compléter le document de l'annexe 4. On choisira le point de fonctionnement d'ICE à 90 Nm et 3000 tr/min (à justifier).

La puissance maximale d'ICE est de 52 kW (constructeur), elle serait donc suffisante pour qu'ICE assure seul la traction de la voiture. Cependant, le point de fonctionnement serait dans une zone (très proche des limites du moteur) où le rendement serait moins bon qu'avec le point choisi.

Ce dernier correspond à une puissance P_{ICE} de 28 274 W, avec un rendement quasi maximal. Le complément de puissance est fourni par la batterie, soit



5 La circulation des énergies en situation n° 4 ramenée sous forme de puissance

une valeur $P_{BATT} = 19 726$ W. La batterie peut fournir cette puissance (inférieure à 21 kW).

ICE est en service, MG1 générateur, MG2 moteur, et la batterie se décharge. Le sens de circulation des énergies est donné sur le schéma 5.

La situation n° 5

La voiture descend une légère pente à 80 km/h. Cette pente n'est pas suffisante pour récupérer de l'énergie, mais la gravité aide le mouvement de la voiture. Ainsi la puissance nécessaire à l'entraînement est réduite à 1 000 W (au lieu des 9 340 sur le plat).

L'état de charge de la batterie est toujours suffisant, une charge n'est pas nécessaire.

Le moteur essence peut-il être arrêté? Justifier.

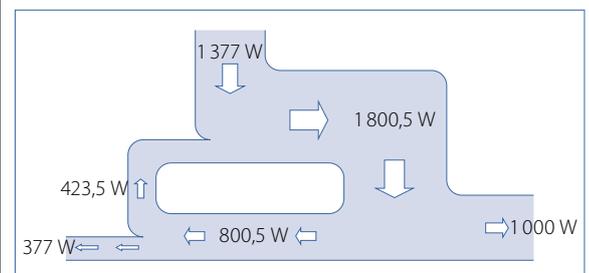
Que pourrait-on dire de la consommation du moteur essence s'il participait seul à la propulsion de la voiture? Expliquer.

ICE doit tourner pour éviter une survitesse de MG1. La puissance nécessaire à la traction est faible, du fait que la gravité aide le mouvement.

Si ICE était utilisé seul, il fonctionnerait avec un mauvais rendement. Une charge mécanique supplémentaire pourrait lui être appliquée en produisant de l'électricité, à condition que la batterie puisse la recevoir. Mais, dans le cas d'une batterie avec un état de charge haut, ce fonctionnement ne peut être envisagé.

Plutôt que de faire fonctionner ICE avec un mauvais rendement, et puisque la batterie est suffisamment chargée, la commande d'ICE est coupée, et la propulsion est électrique. L'arbre d'ICE tourne cependant, et sa vitesse est contrôlée par MG1. La puissance reçue par le moteur essence correspond à ses pertes.

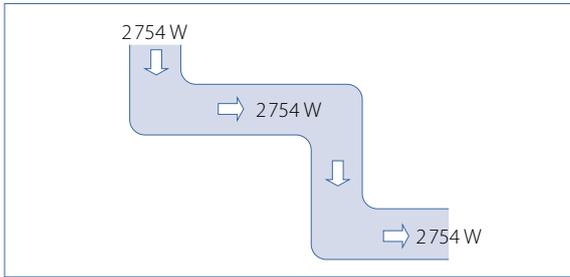
Pour la suite, le moteur essence tourne, mais l'admission de carburant est coupée et l'allumage non commandé. Le pilotage du système assurera $N_{ICE} = 1 000$ tr/min. Dans ces conditions, le couple résistant de l'arbre moteur sera supposé tel que $C_{ICE} = -3,6$ Nm.



6 La circulation des énergies en situation n° 5 ramenée sous forme de puissance

Étudier le comportement du système et compléter le document de l'annexe 5.

ICE est récepteur, MG1 générateur, MG2 moteur, et la batterie se décharge. Le sens de circulation des énergies est donné sur le schéma 6.



7 La circulation des énergies en situation n° 6 ramenée sous forme de puissance

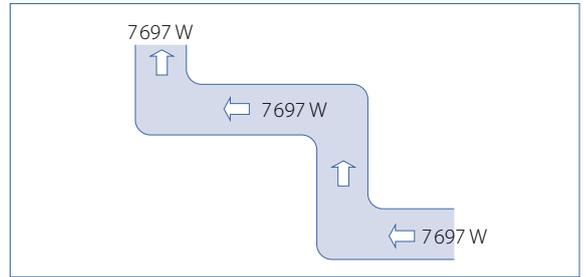
La situation n° 6

La voiture roule à une vitesse stabilisée de 40 km/h sur le plat. La batterie est suffisamment chargée, le système peut passer en mode VE (mode Véhicule Électrique, donc traction avec la seule motorisation électrique).

Rappeler la vitesse maximale de la voiture en mode VE. Calculer la puissance nécessaire pour propulser la voiture à cette vitesse (stabilisée). Conclure en comparant cette valeur à la puissance maximale de la batterie.

Pour les basses vitesses, si le conducteur ne demande pas trop de puissance (accélérations douces, vitesse stabilisée...) et si la batterie est suffisamment chargée, le système peut passer en mode VE.

La vitesse maximale est de 68,03 km/h. À cette vitesse, il faut 6 744 W pour propulser la voiture, ce qui est très inférieur à la puissance maximale de la batterie (≈ 22 kW). Cette marge laisse la possibilité d'accélération en mode VE (sans démarrage d'ICE). Mais, plus on reste longtemps en mode VE, plus la batterie se décharge et plus la probabilité de voir démarrer ICE est grande.



8 La circulation des énergies en situation n° 7 ramenée sous forme de puissance

Étudier le comportement du système et compléter le document de l'annexe 6.

Le sens de circulation des énergies est donné sur le schéma 7.

La situation n° 7

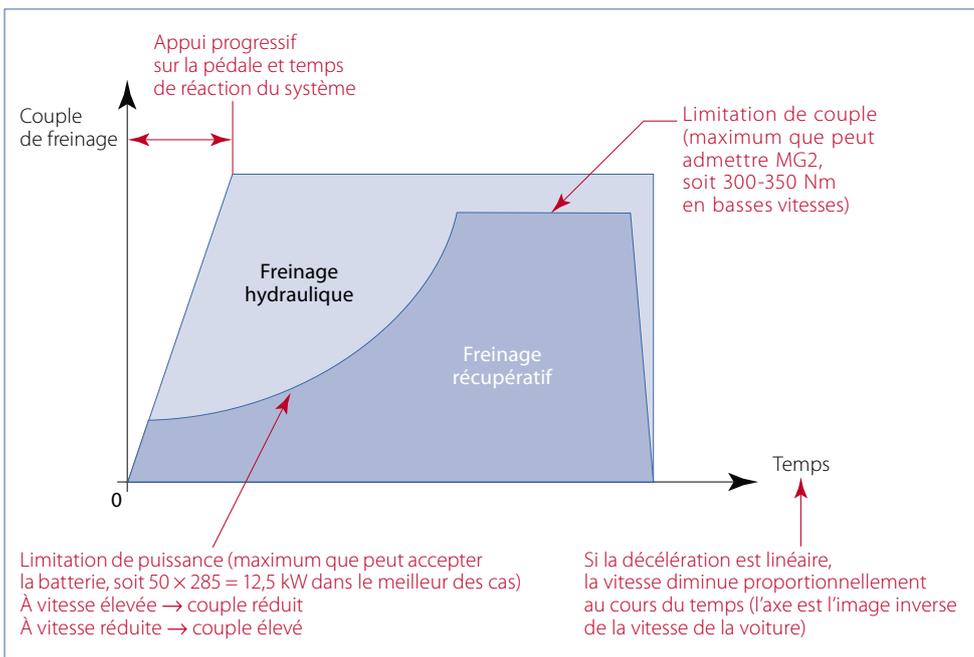
La voiture roule à 40 km/h, et le conducteur appuie sur la pédale de frein. Cette action correspond à un couple de freinage de 50 Nm.

Étudier le comportement du système et compléter le document de l'annexe 6.

Le sens de circulation des énergies est donné sur le schéma 8.

Par quoi le freinage récupératif est-il limité? Expliquer.

- Le freinage récupératif est limité par :
- la puissance maximale que peut accepter la batterie (50 A sous 285 V) ;
 - le couple maximal que peut accepter MG2 (de 300 à 350 Nm en dessous de 1 000 tr/min)



9 Le graphe de combinaison de freinage effectif

Lors d'un freinage important, le freinage récupératif est combiné au freinage hydraulique pour permettre l'arrêt de la voiture dans les meilleures conditions.

Commenter le graphe 9.

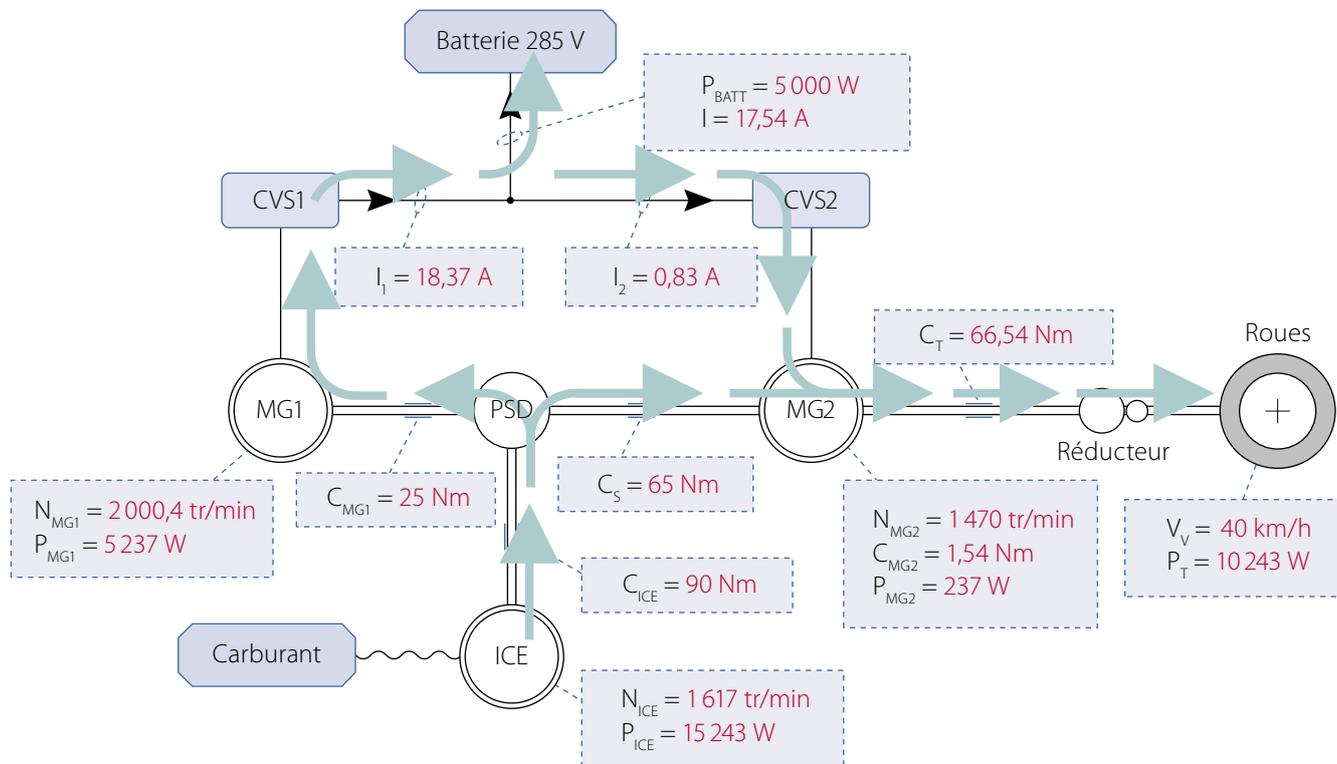
La recherche sur internet

La dernière phase de travail conduit les étudiants à effectuer des recherches sur internet afin de réaliser les comparatifs suivants :

- Rechercher les caractéristiques du modèle Toyota Prius HSD 2004 et déterminer les principales différences avec la voiture étudiée.
- Rechercher les modèles de voitures hybrides actuellement existants. Classifier ces véhicules selon le type d'hybridation réalisé (série, parallèle, parallèle-série...).

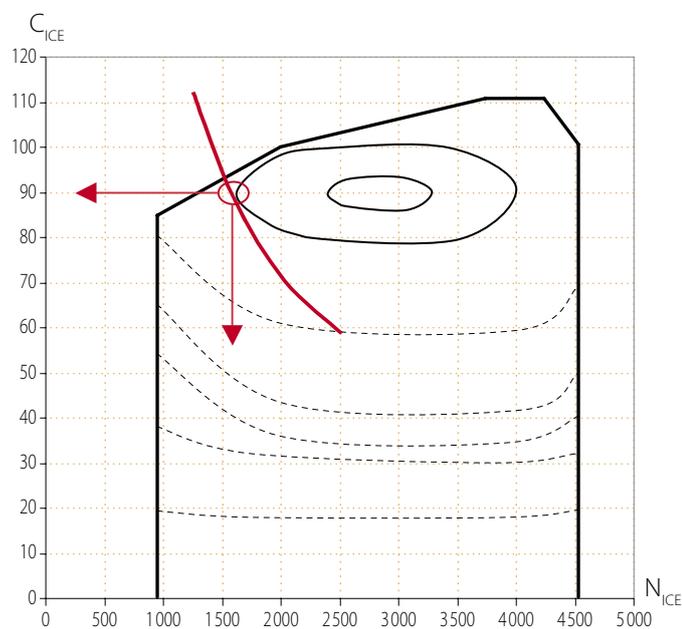
ANNEXE 1

Le fonctionnement du système en situation n° 1



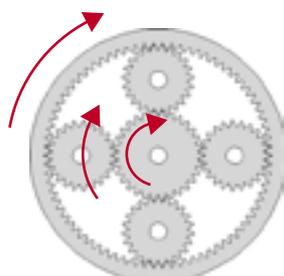
$$N_{MG2} = 36,748 V_V$$

$$N_{MG1} = 3,6 N_{ICE} - 2,6 N_{MG2}$$



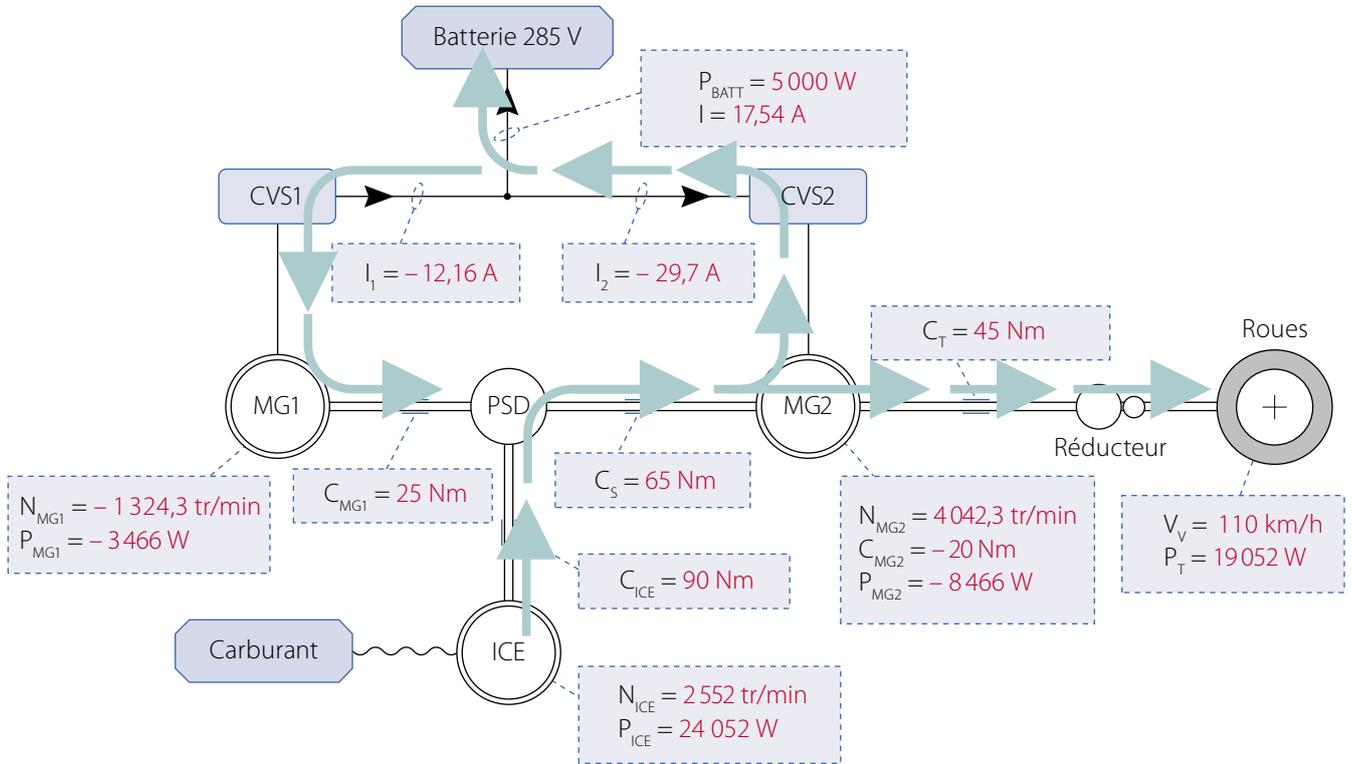
$$C_{MG1} = 1/3,6 \cdot C_{ICE}$$

$$C_S = 2,6/3,6 \cdot C_{ICE}$$



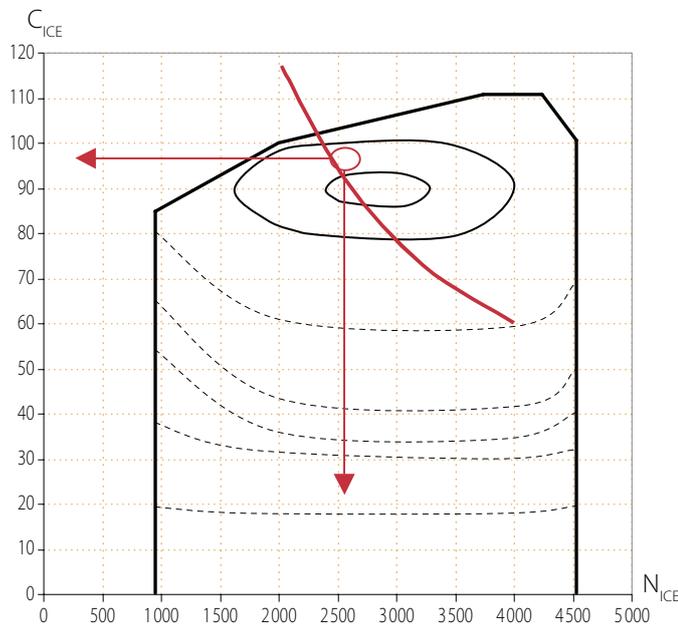
ANNEXE 2

Le fonctionnement du système en situation n° 2



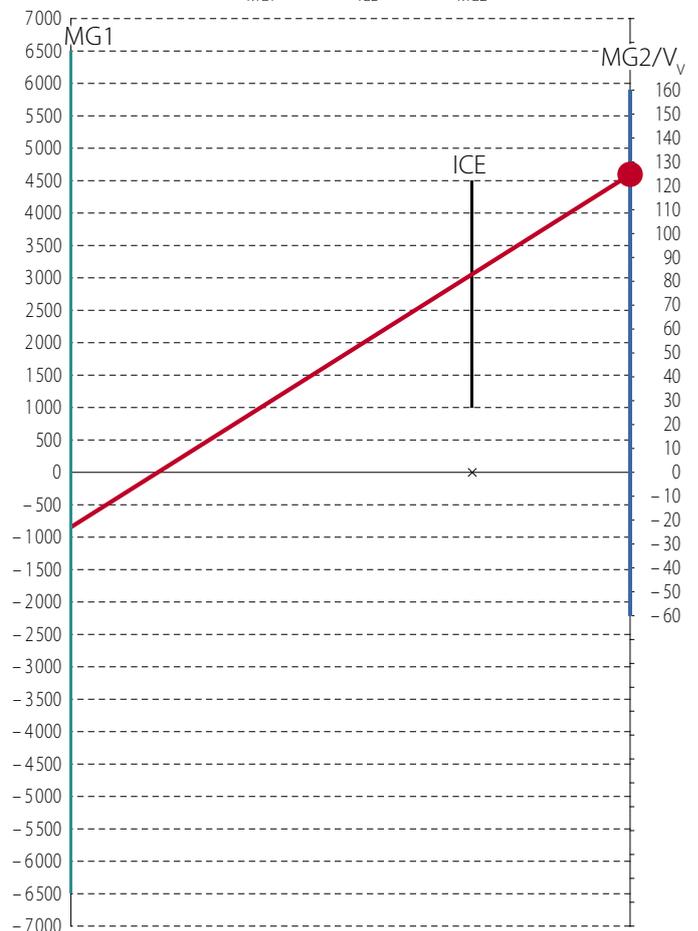
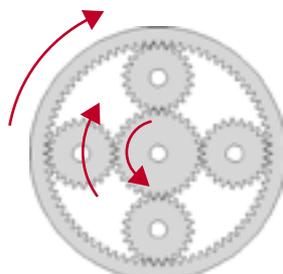
$$N_{MG2} = 36,748 V_V$$

$$N_{MG1} = 3,6 N_{ICE} - 2,6 N_{MG2}$$



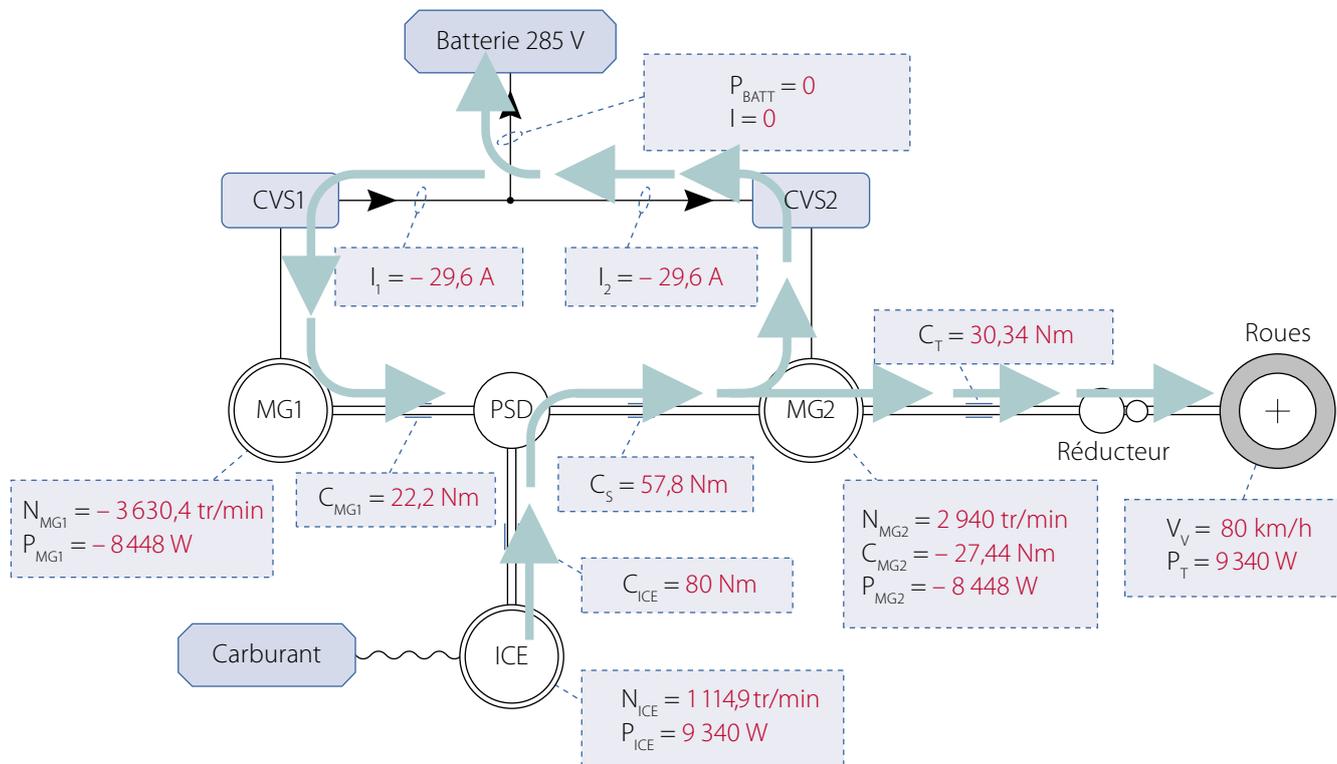
$$C_{MG1} = 1/3,6 \cdot C_{ICE}$$

$$C_S = 2,6/3,6 \cdot C_{ICE}$$



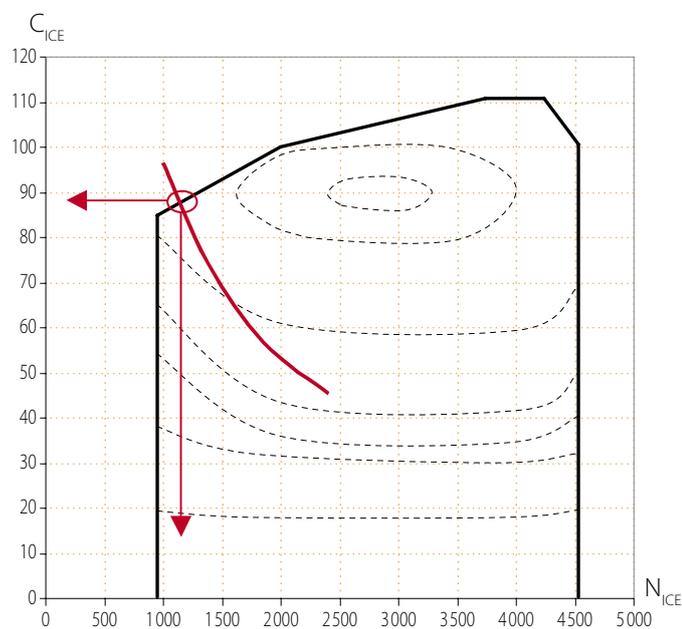
ANNEXE 3

Le fonctionnement du système en situation n° 3



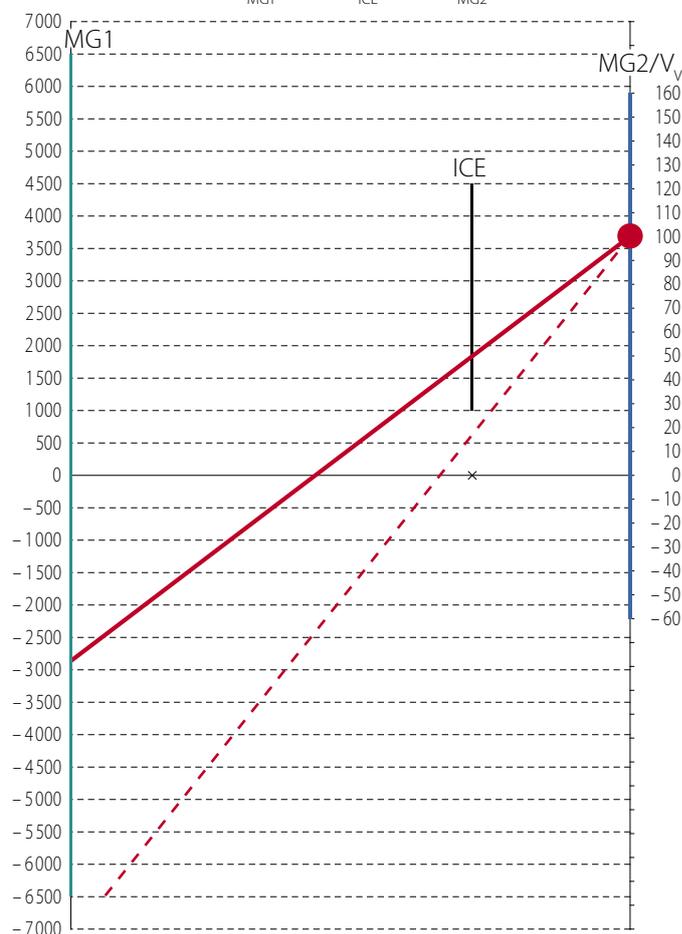
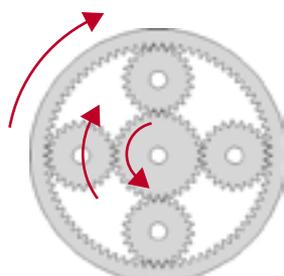
$$N_{MG2} = 36,748 V_V$$

$$N_{MG1} = 3,6 N_{ICE} - 2,6 N_{MG2}$$



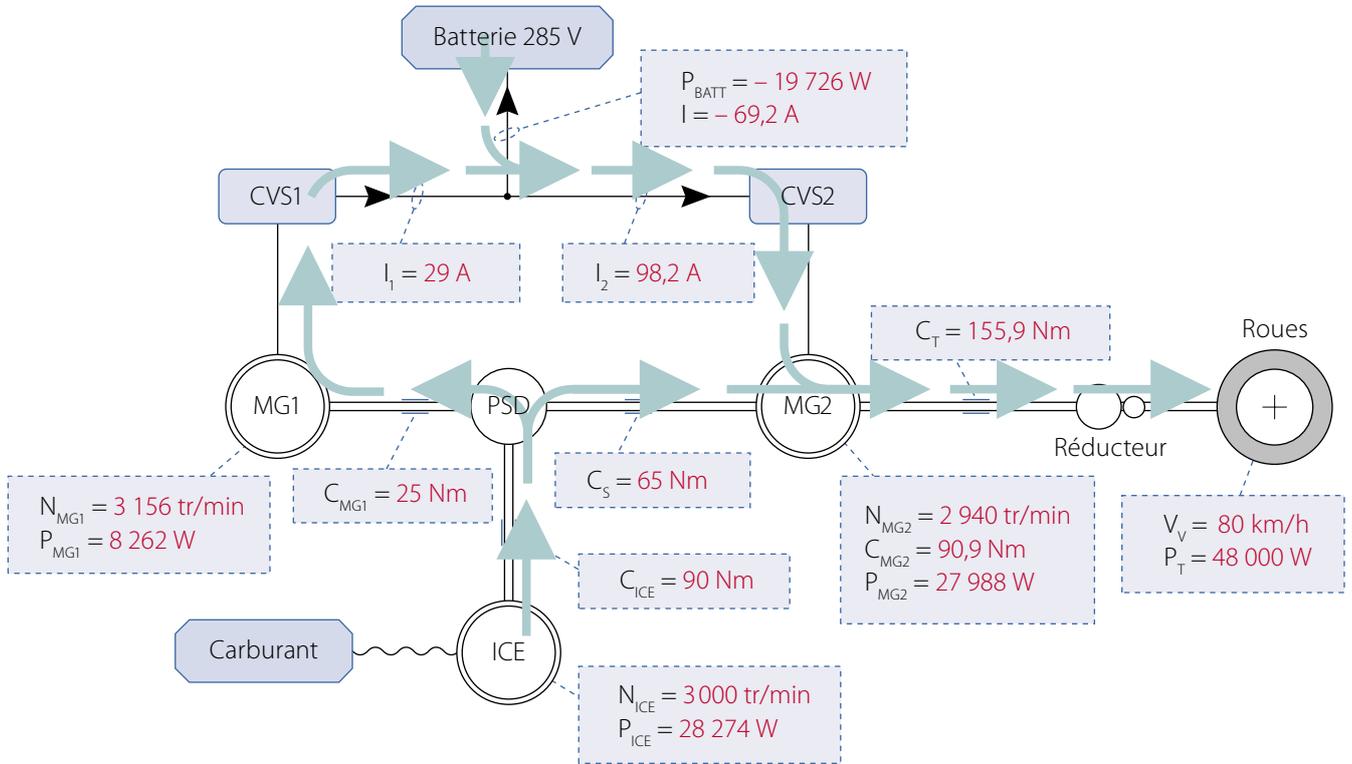
$$C_{MG1} = 1/3,6 \cdot C_{ICE}$$

$$C_S = 2,6/3,6 \cdot C_{ICE}$$



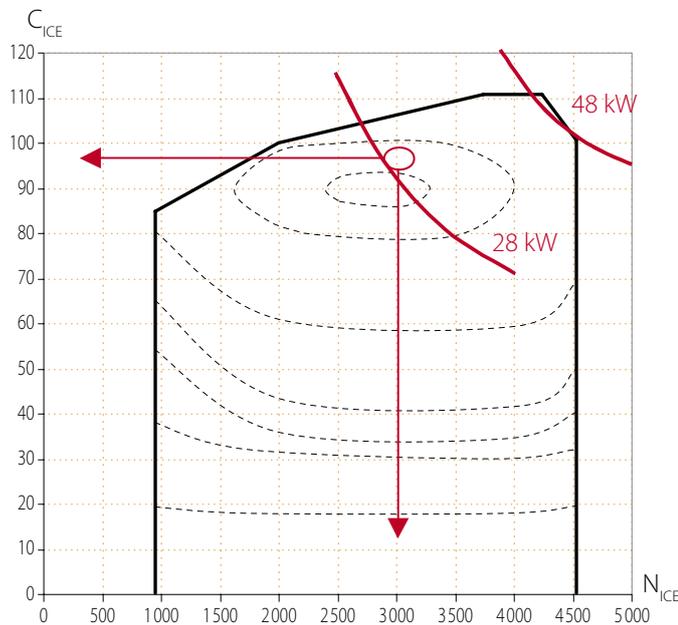
ANNEXE 4

Le fonctionnement du système en situation n° 4



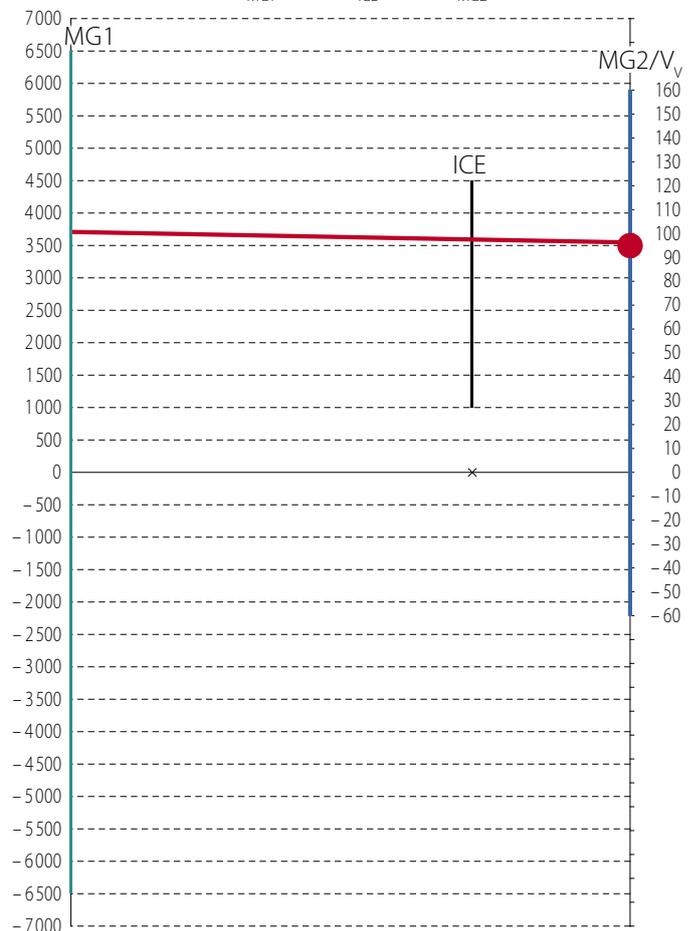
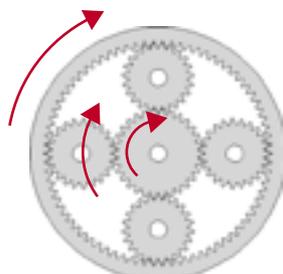
$$N_{MG2} = 36,748 V_V$$

$$N_{MG1} = 3,6 N_{ICE} - 2,6 N_{MG2}$$



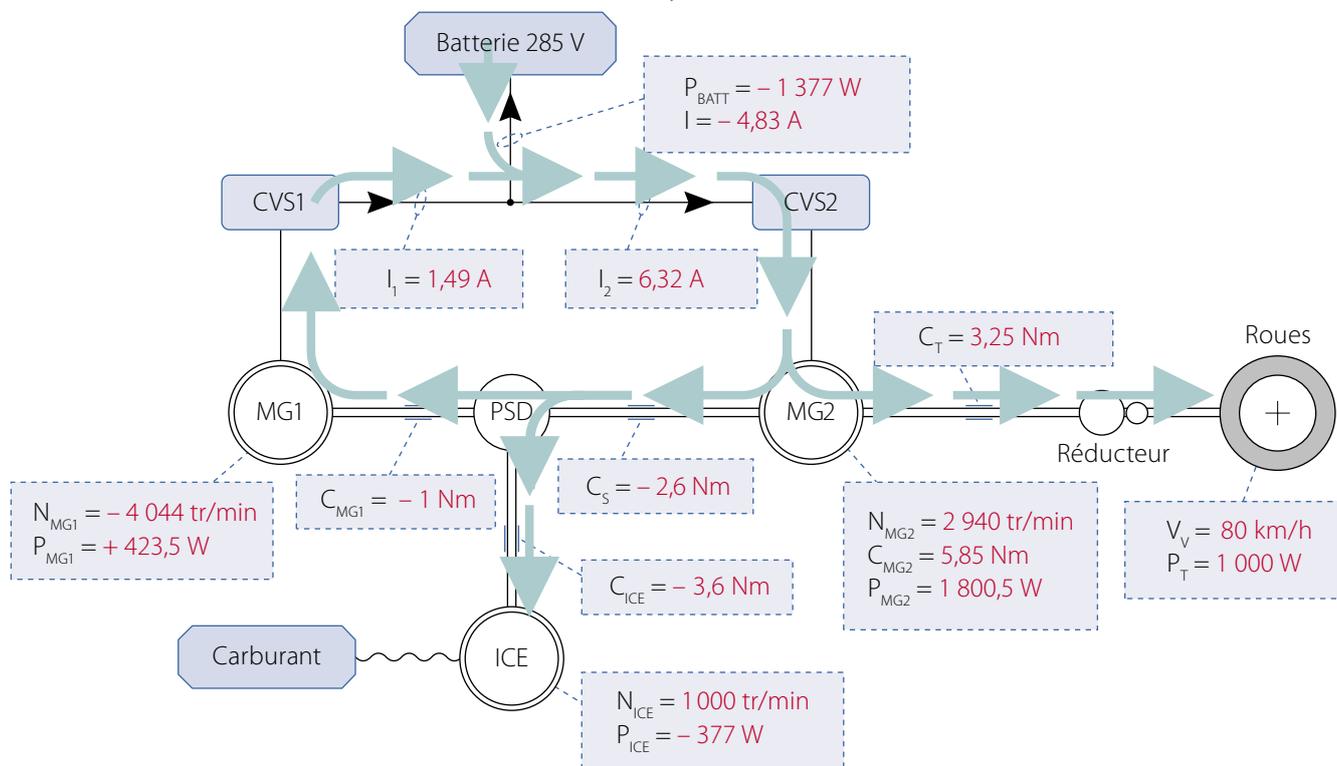
$$C_{MG1} = 1/3,6 \cdot C_{ICE}$$

$$C_S = 2,6/3,6 \cdot C_{ICE}$$



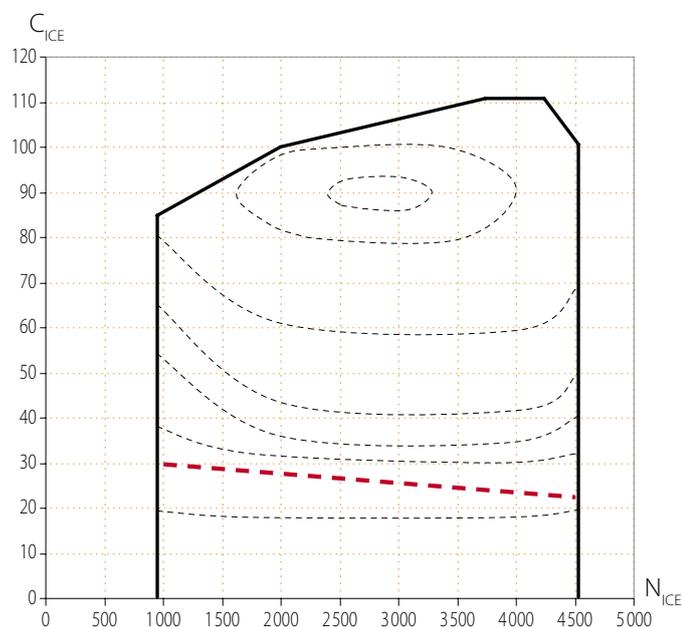
ANNEXE 5

Le fonctionnement du système en situation n° 5



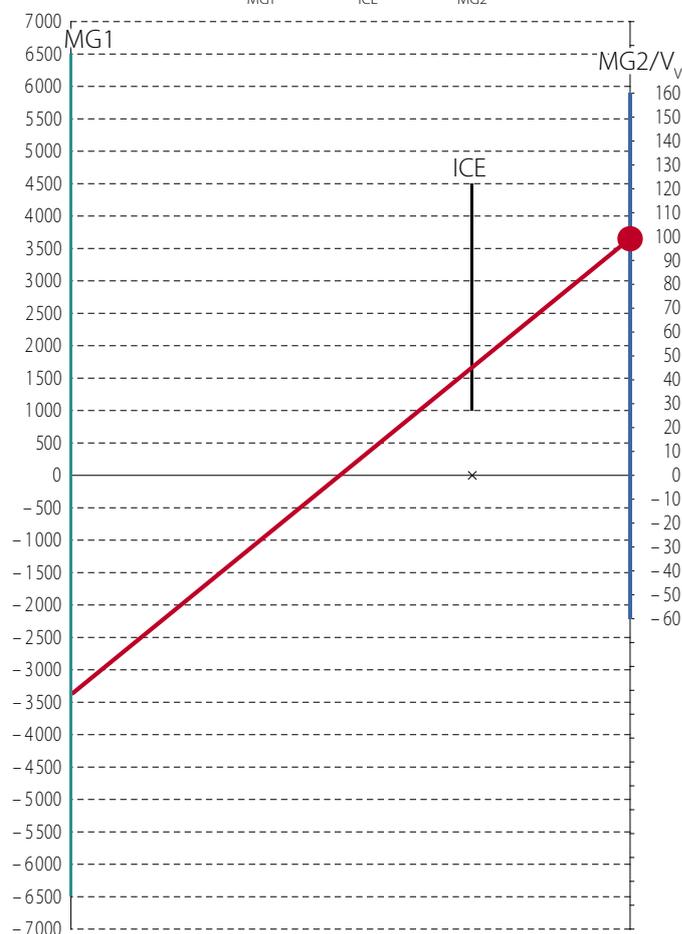
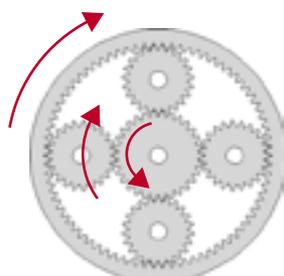
$$N_{MG2} = 36,748 V_V$$

$$N_{MG1} = 3,6 N_{ICE} - 2,6 N_{MG2}$$



$$C_{MG1} = 1/3,6 \cdot C_{ICE}$$

$$C_S = 2,6/3,6 \cdot C_{ICE}$$



ANNEXE 6

Le fonctionnement du système en situations n^{os} 6 et 7

