

BACCALAURÉAT GÉNÉRAL

SÉRIE SCIENTIFIQUE

ÉPREUVE DE SCIENCES DE L'INGÉNIEUR

Session 2020

Durée de l'épreuve : 4 heures

Coefficient 4,5 pour les candidats ayant choisi un enseignement de spécialité autre que sciences de l'ingénieur.

Coefficient 6 pour les candidats ayant choisi l'enseignement de sciences de l'ingénieur comme enseignement de spécialité.

Matériel autorisé

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

Aucun document autorisé.

Dès que le sujet est remis, assurez-vous qu'il est complet.
Ce sujet comporte 23 pages numérotées de 1 sur 23 à 23 sur 23.

Les pages 20 à 23 sont à rendre avec la copie.

Option Stop & Go sur chariot de manutention télescopique



Constitution du sujet

1	Texte.....	Page 3
2	Documents techniques.....	Page 18
3	Documents réponses.....	Page 20

Le sujet comporte 22 questions.

**Les documents réponses DR1 à DR4 pages 20 à 23
sont à rendre avec la copie.**

Le groupe français MANITOU est leader mondial dans la fabrication et la commercialisation de matériels de manutention dans différents secteurs (construction, agriculture, industrie).

Afin de répondre aux évolutions du marché, le groupe MANITOU s'est engagé dans une démarche RSE (Responsabilité Sociale d'Entreprise) qui respecte les principes du développement durable. Une illustration de cette approche est le programme REDUCE qui vise à améliorer l'efficacité énergétique des matériels tout en garantissant les performances pour l'utilisateur.

C'est dans ce contexte que s'inscrit la commercialisation d'une option d'arrêt et de redémarrage automatique du moteur thermique sur des modèles de la gamme de chariots télescopiques incluant le modèle MT 1840. Cette option, nommée Stop & Go, est inspirée des solutions déployées sur les véhicules de tourisme.

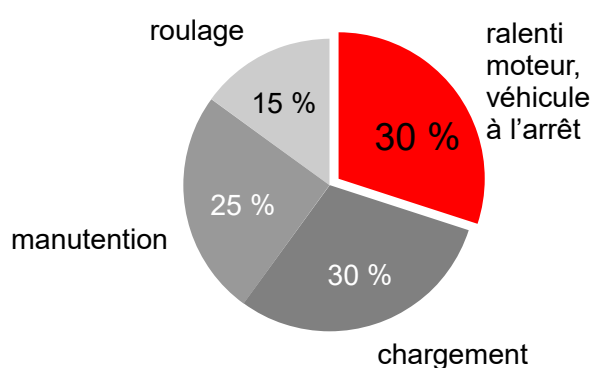


Figure 1 : répartition des utilisations du chariot MT 1840

Le chariot télescopique MT 1840 est destiné principalement au secteur de la construction. Il sert à déplacer des gravats, mettre en place des palettes, etc.

Une étude auprès des usagers montre que le mode ralenti moteur, véhicule à l'arrêt, représente une part significative de l'utilisation du chariot (figure 1).

Le système Stop & Go provoque l'arrêt du moteur thermique si le conducteur n'actionne pas les commandes (joystick de manœuvre de la flèche, pédale d'accélérateur) pendant plus de 30 secondes. Il relance instantanément le moteur dès l'activation d'une commande.

Indépendamment de l'aspect environnemental, le coût total de possession (consommation, coût d'entretien, valeur de revente) est un élément important, pour l'acheteur, lors du choix de cette option.

L'objectif du sujet est de vérifier la pertinence des choix technologiques adoptés pour le système Stop & Go.

1. Réduire la consommation et les émissions polluantes

Objectif(s) de cette partie : justifier le choix de cette option d'un point de vue économique et environnemental.

Afin de connaître le coût d'utilisation d'un chariot, des mesures de consommation selon un protocole standardisé sont effectuées sur quatre activités représentatives d'un chariot télescopique : manutention, chargement, ralenti moteur véhicule à l'arrêt et roulage. Les consommations de gazole en litres par heure sont indiquées dans le tableau de la figure 2.

manutention (l/h)	chargement (l/h)	ralenti moteur véhicule à l'arrêt (sans Stop & Go) (l/h)	roulage (l/h)
6,3	13,6	1,6	12,8

Figure 2 : consommations moyennes de gazole du chariot MT 1840.

Les principaux facteurs du coût total de possession du chariot sont :

- l'utilisation moyenne de 800 heures par an (manutention, chargement, ralenti, roulage) ;
- la période d'amortissement sur 5 ans ;
- le prix du gazole réservé aux engins de chantier à 0,9 €/l ;
- la maintenance toutes les 500 heures.

On considère qu'avec l'option Stop & Go le moteur est arrêté pendant les périodes de ralenti véhicule à l'arrêt.

Q1. Déterminer à l'aide des figures 1 page 3 et 2 page 4 le coût du gazole sur une période de cinq ans. **Calculer** et **justifier** l'économie maximale réalisable avec l'option Stop & Go sur la même période.

En conditions réelles, on estime l'économie de carburant à 6 % soit 1 740 € sur 5 années.

Dans le secteur des matériels professionnels, la valeur de revente dépend principalement de l'ancienneté (valeur du véhicule actualisée tous les ans, document DT1 page 18-tableau 1) et du nombre d'heures de fonctionnement du moteur (document DT1-tableau 2).

Les coûts des entretiens programmés, en fonction du temps de fonctionnement du moteur, sont définis dans le tableau 3 du document DT1 page 18.

La valeur du véhicule à la revente est donnée par l'équation suivante :

$$\text{Valeur de revente} = \text{Valeur actualisée} \times \text{Coefficient de correction horaire}$$

Q2. Calculer les prix à la revente, au terme de la période d'amortissement, d'un chariot équipé et d'un chariot non équipé de l'option Stop & Go. **Déterminer** le coût d'entretien économisé sur la même période pour un chariot équipé de l'option Stop&Go.

La combustion des carburants produit des gaz à effet de serre, en particulier du dioxyde de carbone (CO₂), qui contribuent au phénomène de changement climatique. La France s'est fixé pour objectif de réduire les émissions de CO₂ du secteur des transports de 20 % d'ici à 2020¹.

Q3. Sachant que la combustion d'un litre de gazole produit 2,6 kg de CO₂, **calculer** la réduction des émissions de CO₂ en kg sur 5 ans avec l'utilisation du système Stop & Go.

Le coût de l'option Stop & Go s'élève à 4 200 € à l'achat du véhicule.

Q4. Conclure, en quelques lignes, sur la pertinence de l'option Stop & Go d'un point de vue économique et environnemental.

2. Contraintes dues à la dynamique de lancement du moteur

Objectif(s) de cette partie : **estimer** l'influence des effets dynamiques sur le dimensionnement des éléments mécaniques.

Pour redémarrer le moteur, le constructeur Manitou a choisi un démarreur hydraulique accouplé directement au vilebrequin via la poulie d'entraînement des organes de service. Cette solution est plus robuste et plus rapide qu'un démarreur classique électrique.

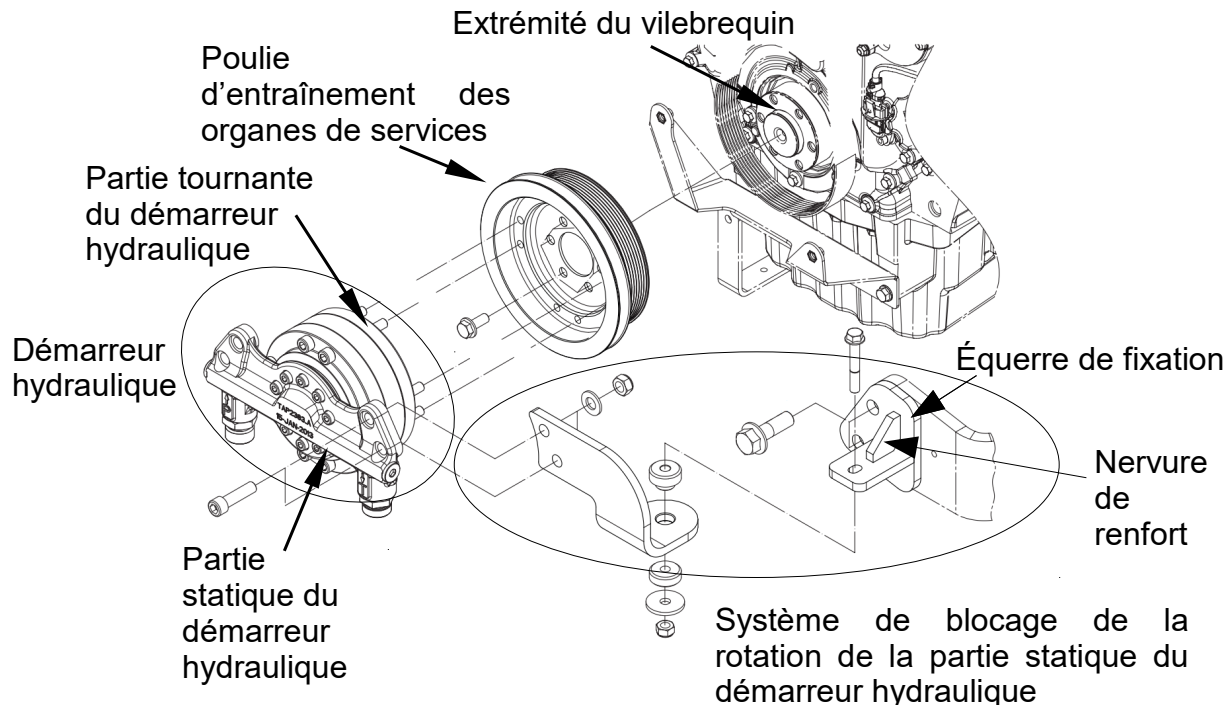


Figure 3 : liaison du démarreur hydraulique au moteur thermique et au bâti

¹ Source : ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie)

Le démarreur hydraulique entraîne le moteur thermique via une roue libre (figure 6 page 7), intégrée au démarreur et permettant d'assurer un accouplement temporaire entre la partie tournante du démarreur hydraulique et l'arbre vilebrequin du moteur.

La figure 4 présente les évolutions des vitesses du moteur et du démarreur lors d'un « démarrage hydraulique » obtenues à partir d'un modèle de comportement.

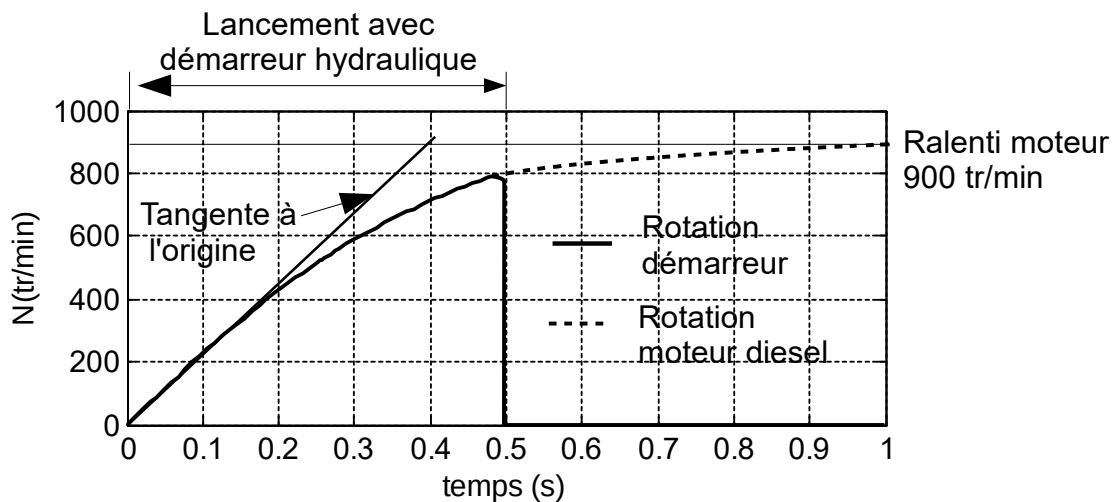


Figure 4 : simulation des évolutions des vitesses du moteur et du démarreur lors d'un « démarrage hydraulique »

Q5. Justifier la nécessité de l'utilisation d'une roue libre dans la chaîne de transmission de puissance.

Q6. En exploitant le tracé de la tangente à l'origine de la vitesse de rotation du moteur (figure 4), **déterminer** l'accélération angulaire nécessaire au démarrage en $\text{rad}\cdot\text{s}^{-2}$.

La partie statique du démarreur est immobilisée en rotation par un appui déporté en A (figures 3 page 5 et 5 page 6).

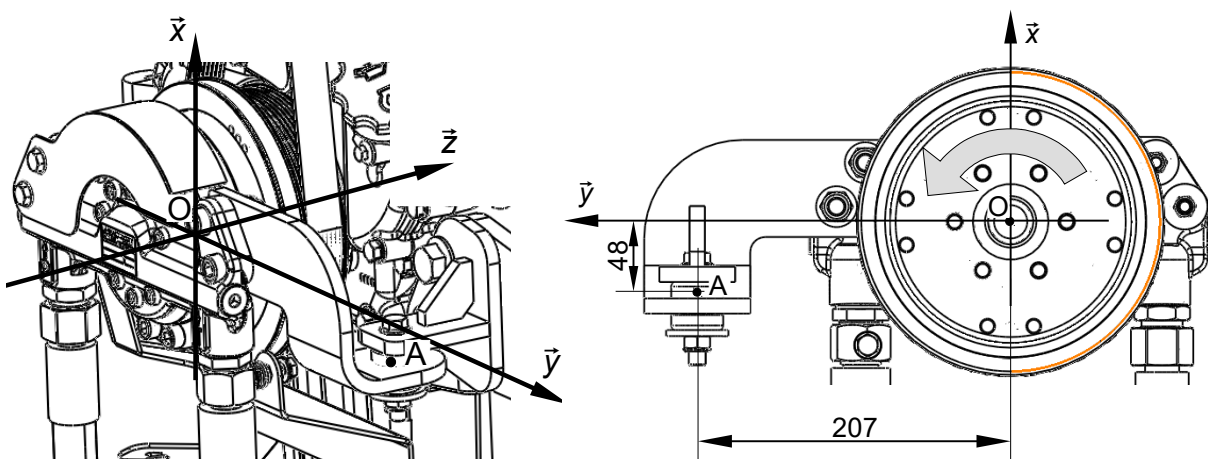


Figure 5 : démarreur hydraulique et sa fixation au bâti moteur

La modélisation mécanique de l'ensemble {moteur + démarreur hydraulique} est donnée figure 6.

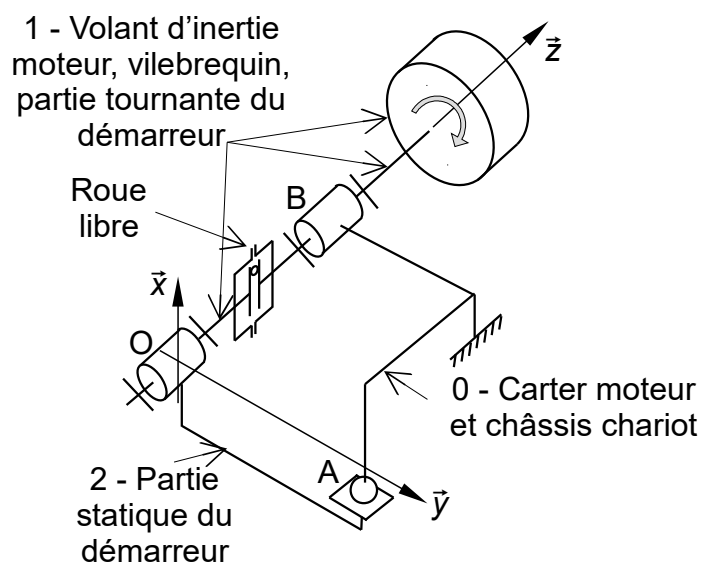


Figure 6 : modélisation du moteur et du démarreur hydraulique

Données :

- le moment d'inertie des pièces en rotation est $J_{1,\bar{z}} = 1,9 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$;
- le couple du démarreur est modélisé par $\vec{C}_{2\rightarrow 1} = C_{dem}\cdot\vec{z}$;
- le couple de frottement du moteur issu des données constructeur est évalué à $\vec{C}_{Frott\rightarrow 1} = C_f\cdot\vec{z} = -60\cdot\vec{z}$ en $\text{N}\cdot\text{m}$;
- les liaisons L_{12} en O et L_{01} en B sont des liaisons pivot parfaites d'axe (O, \bar{z}) ;
- la liaison L_{02} en A est une liaison ponctuelle sans frottement de normale (A, \bar{x}) .

Q7. Appliquer l'équation du moment dynamique au point O à l'ensemble 1 (volant d'inertie, moteur, vilebrequin, partie tournante du démarreur) dans son mouvement par rapport bâti pour **déterminer** le couple C_{dem} que le démarreur hydraulique doit produire afin d'obtenir l'accélération voulue.

La figure 7 page 8 présente les résultats de simulation du couple fourni par le démarreur en fonction du temps (s) lors du « démarrage hydraulique ».

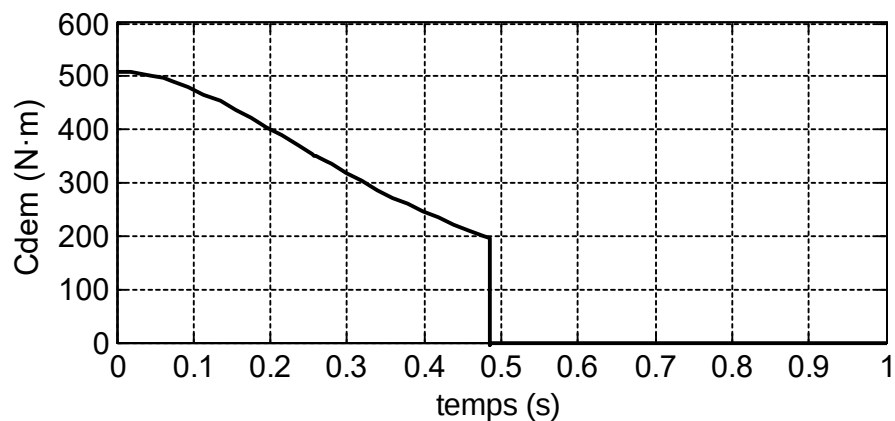


Figure 7 : simulation du couple de démarrage hydraulique

Q8. À partir de l'étude de l'équilibre de la pièce 2 (partie statique du démarreur) et en appliquant l'équation des moments au point O (figure 6 page 7), **déterminer** la force appliquée au point A lorsque le couple C_{dem} est maximal.

Une étude de la résistance de l'équerre qui bloque la rotation du bras 2 est nécessaire. Cette pièce est initialement en deux parties (semelle et languette) soudées.

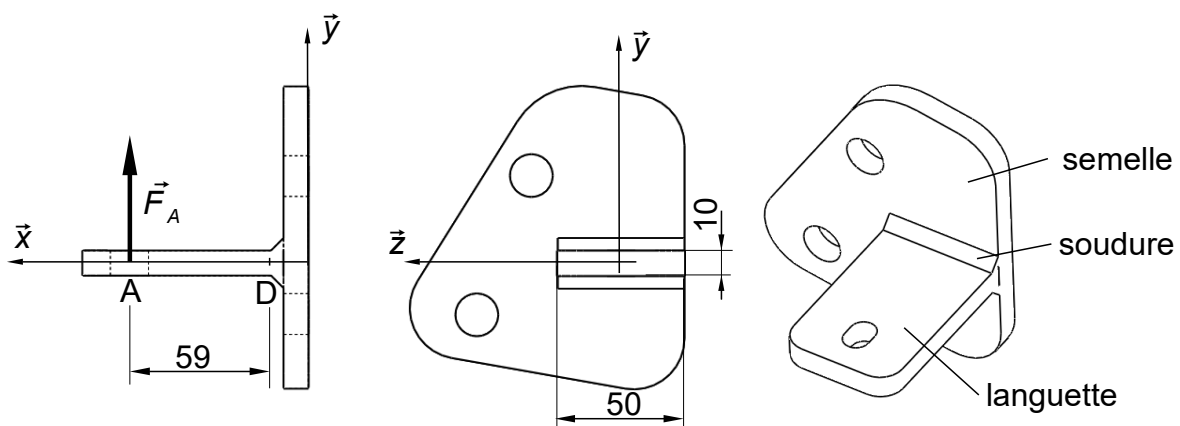


Figure 8 : géométrie et chargement de l'équerre (dimensions en millimètres)

La force en A prise en compte est de 2 500 N. La pièce est en acier de construction S235 ($R_e=235$ MPa, $R_r=360$ MPa, $E=210$ GPa).

Les résultats d'une simulation des sollicitations dans l'équerre sont donnés figure 9 page 9.

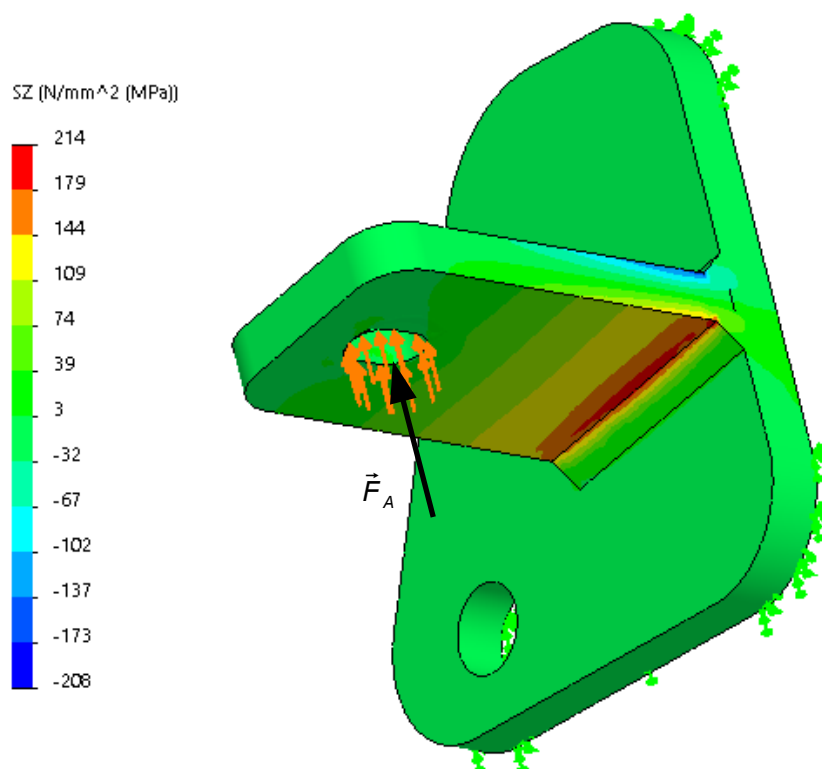


Figure 9 : simulation des sollicitations de l'équerre

Q9. Identifier la zone la plus sollicitée de la pièce et préciser à quel(s) type(s) de sollicitation(s) elle est soumise.

La contrainte maximale de traction déterminée à l'aide d'un logiciel de calcul par éléments finis est de 214 MPa. Le coefficient de sécurité retenu est de $s=1,3$.

Q10. Déterminer si la condition de résistance pratique à la traction R_{pe} est respectée, en déduire si la nervure de renfort présente sur la pièce, figure 3 page 5, est justifiée.

3. Analyse des flux liés au fonctionnement

Objectif(s) de cette partie : analyser et valider la solution mise en œuvre pour assurer un redémarrage du moteur thermique à sa vitesse de ralenti de $900 \text{ tr}\cdot\text{min}^{-1}$ en moins de 0,5 s.

La figure 10 page 10 présente l'ensemble des composants de l'option Stop & Go.

Le démarreur hydraulique est alimenté en huile par un accumulateur hydraulique lui-même alimenté en huile au moyen d'un groupe électro-pompe.

Le groupe électro-pompe est alimenté électriquement par une batterie.

Dans le bloc de fonctions hydrauliques, un capteur de pression, relié à un calculateur dédié appelé SPU (Safety Power Unit), permet d'arrêter le groupe électro-pompe lorsque la pression d'huile dans l'accumulateur est suffisante (accumulateur dit chargé).

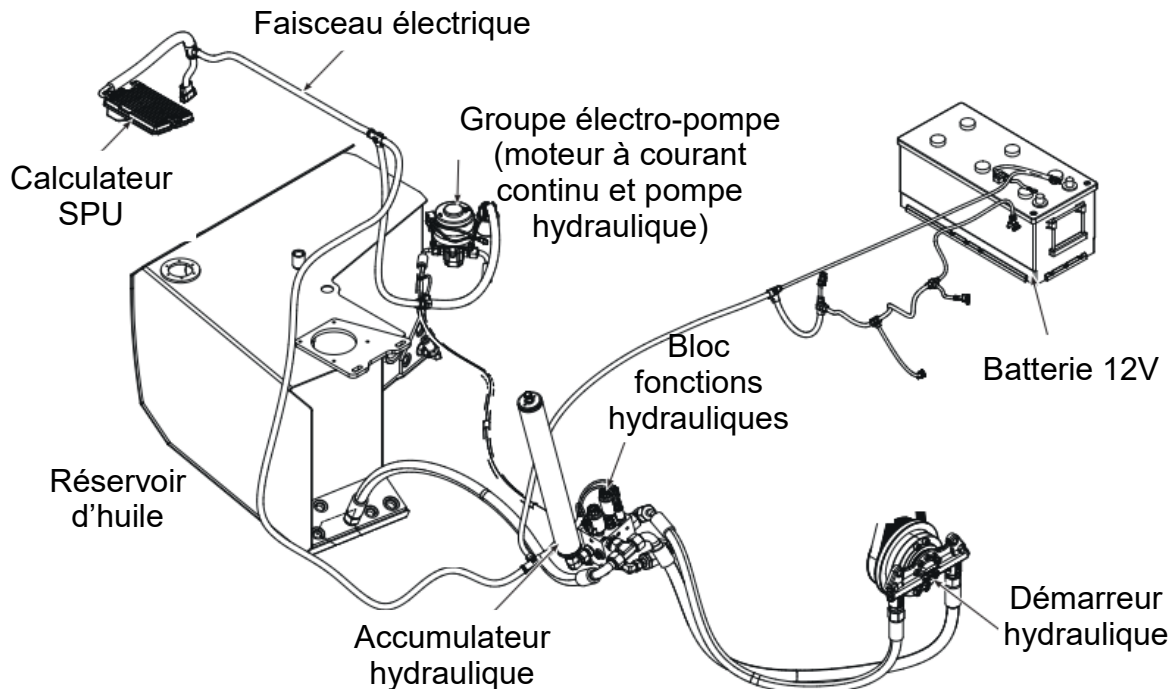


Figure 10 : ensemble des composants du système Stop & Go

Quand les conditions d'arrêt sont réunies (moteur thermique fonctionnant depuis au moins 2 minutes, pas de commande hydraulique depuis 30 secondes, véhicule à l'arrêt, Stop & Go activé), le moteur thermique est arrêté. La figure 11 présente la circulation de l'huile pendant cette phase.

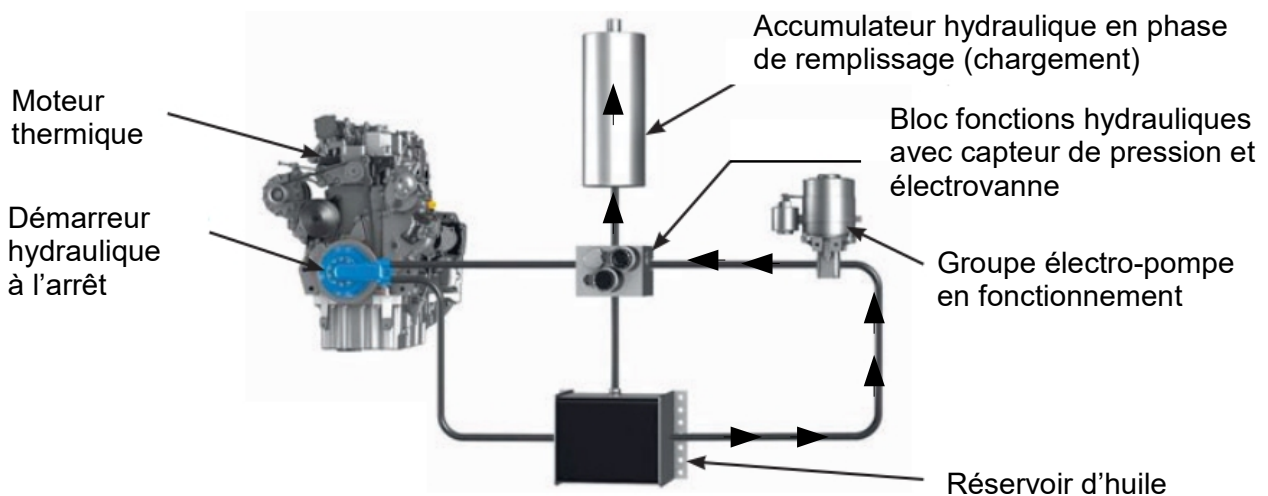


Figure 11 : circulation de l'huile lors du chargement de l'accumulateur (mise sous pression d'huile)

Si les conditions de redémarrage sont réunies (demande de manœuvre hydraulique, accumulateur chargé, conditions de sécurité remplies, capot moteur fermé, etc), l'accumulateur est déchargé dans le démarreur hydraulique pour relancer le moteur. La figure 12 présente la circulation de l'huile pendant cette phase.

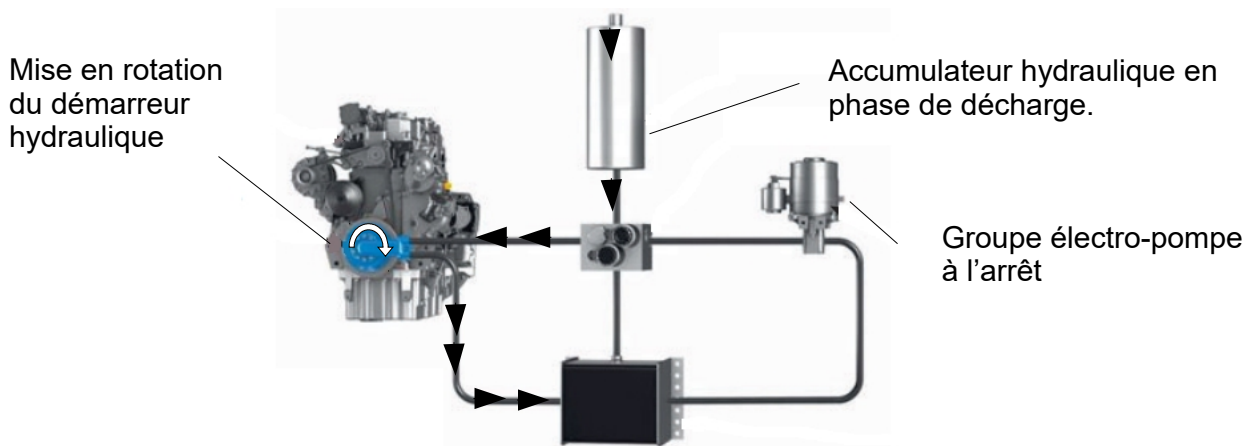


Figure 12 : circulation de l'huile lors du déchargement de l'accumulateur

Le document DR1 page 20 représente une description partielle de la chaîne d'énergie et d'information de la fonction Stop & Go.

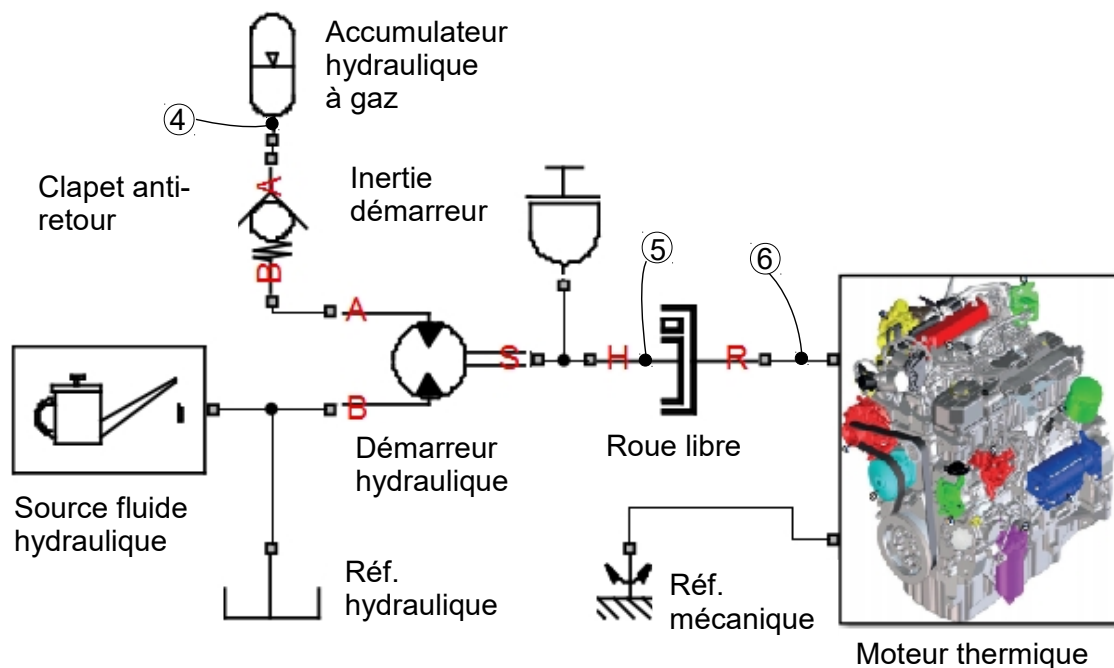
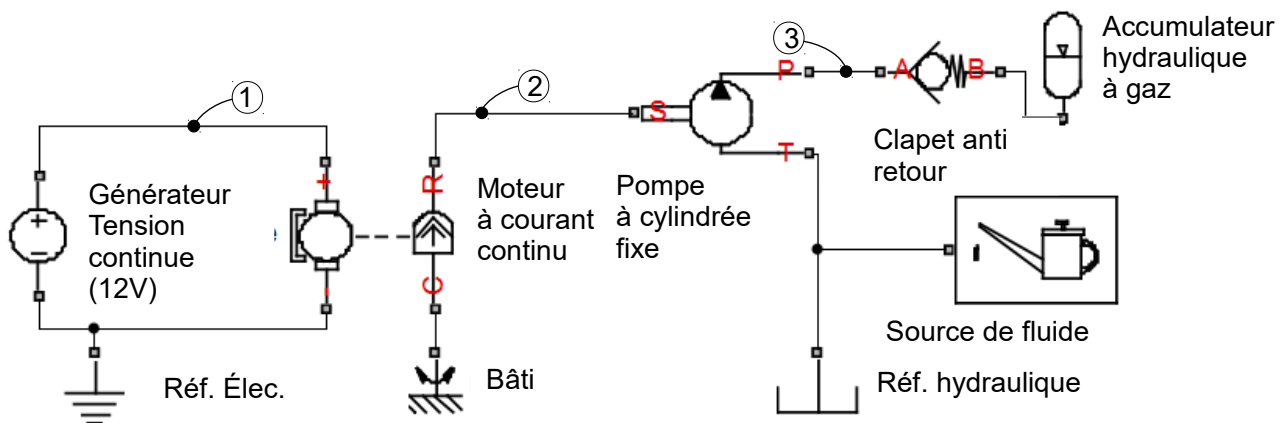
Q11. Compléter les cadres grisés du document DR1 page 20 en précisant les composants ou les fonctions techniques manquantes.

Le schéma hydraulique de l'option Stop & Go (document DT2 page 19) décrit les phases de fonctionnement (charge et décharge) de l'accumulateur. Les chronogrammes du document DR2 page 21 présentent deux phases de redémarrage du moteur entrecoupées d'un arrêt.

Q12. À partir du document DT2 page 19, **compléter** le chronogramme du document DR2 page 21 en indiquant l'état de pilotage (0 ou 1) à imposer aux électro-vannes VS1 et VS2 correspondant à la situation décrite.

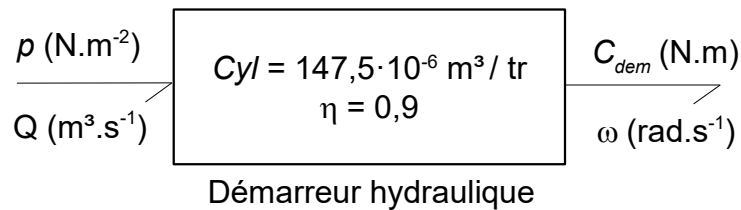
Q13. Sur les deux schémas hydrauliques du document DR3 page 22, **colorier** les cases actives des électro-vannes. **Surligner** en rouge les conduites sous pression et en bleu les conduites basse pression. **Indiquer** par des flèches le sens de circulation du fluide.

La modélisation de ce système avec un logiciel multiphysique permet de simuler le comportement de la charge de l'accumulateur et le lancement du moteur thermique (figures 13 et 14 page 12).



Q14. Sur le document DR4 page 23, **définir** dans le tableau, les variables effort et flux d'énergie, ainsi que leur unité, aux différents points repérés (1, 2, 3, 4, 5, 6) sur les figures 13 et 14. **Donner** l'expression de la puissance en ces points.

Pour assurer le démarrage hydraulique, on considère que l'accumulateur doit contenir suffisamment d'huile pour entraîner le moteur sur 3 tours. Les caractéristiques du démarreur sont définies ci-dessous.



- Pression accumulateur : p .
- Puissance instantanée hydraulique : $P_{hyd} = Q \cdot p$.
- Débit instantané : $Q = \frac{Cyl}{2\pi} \cdot \omega$ (Cyl est la cylindrée du démarreur).
- Puissance instantanée mécanique : $P_{mec} = C_{dem} \cdot \omega$.

Q15. À partir des relations données, **déterminer** l'expression de la pression p en fonction du couple C_{dem} à fournir en prenant en compte le rendement. **En déduire** si la pression maximale prévue pour l'accumulateur (250 bars) permet de produire le couple de démarrage nécessaire de 500 N·m.

La figure 15 présente les vitesses de rotation du moteur mesurée et simulée dans le cas d'un lancement hydraulique.

La figure 16 page 14 présente la vitesse de rotation du moteur mesurée dans le cas d'un démarrage classique par démarreur électrique.

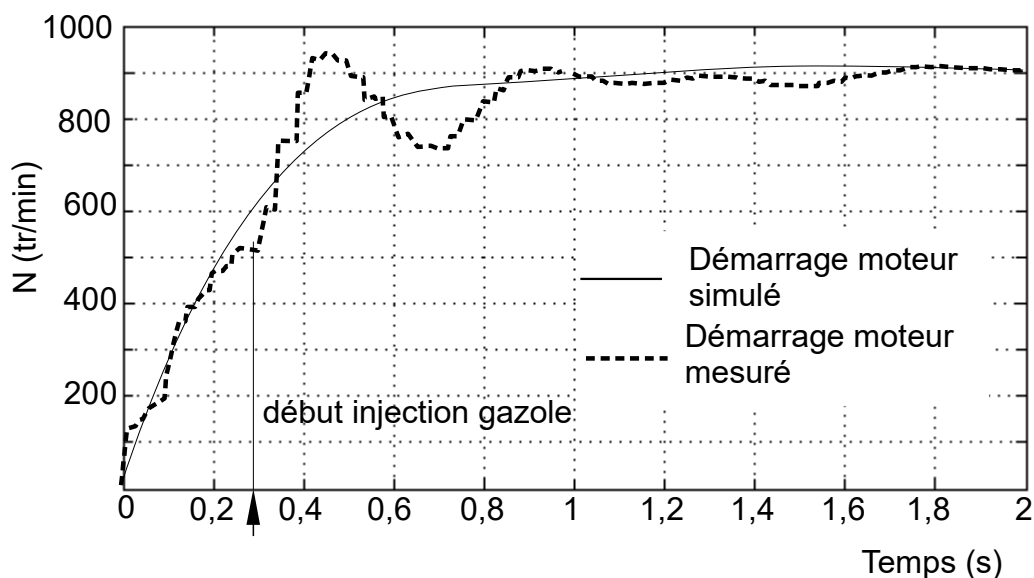


Figure 15 : courbes de vitesse lors du démarrage du moteur thermique par lancement hydraulique

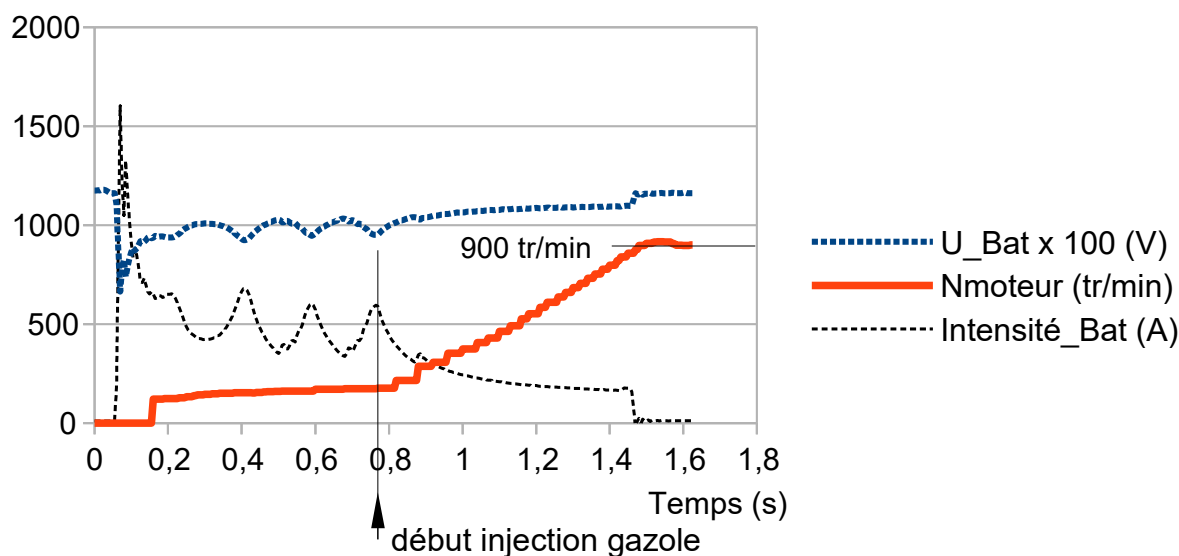


Figure 16 : courbe de vitesse moteur et courbes de tension et intensité batterie lors du démarrage du moteur thermique par lancement électrique

La durée de lancement est définie par le temps que met la vitesse du moteur pour atteindre 95 % de sa valeur finale de $900 \text{ tr}\cdot\text{min}^{-1}$.

Q16. Déterminer l'écart entre la durée de lancement hydraulique du moteur mesurée et celle issue de la simulation.

Q17. Déterminer la durée du lancement électrique du moteur et **conclure** sur le choix du constructeur.

4. Évaluation de l'autonomie de la batterie

Objectif(s) de cette partie : analyser l'autonomie de la batterie en phase de Stop et évaluer la nécessité de l'augmentation de sa capacité.

Avec l'option Stop & Go, en phase de Stop, les différents groupes consommateurs d'énergie (figure 17 page 15) doivent rester alimentés en énergie alors que la batterie n'est plus rechargée. Une batterie plomb-acide standard permet de réaliser cette fonction.

L'étude qui suit a pour objectif de vérifier si la batterie (110 A·h) du modèle sans l'option Stop & Go peut répondre à cette contrainte supplémentaire.

Afin de limiter les coûts de maintenance, la batterie doit avoir une durée de vie de 3 ans.

Le tableau de la figure 17 page 15 fournit les principales consommations électriques du chariot élévateur.

Groupes	Composants	Consommation (A)
Consommateurs permanents	Manimax Cluster	0,18
	Manimax Power	0,8
	Pupitre nacelle	0,8
	Inclinomètre	0,05
	Autres conso	0,5
Signalisation	Phares de travail	20
	Gyrophare	3,5
	Plafonnier	1,45
Ventilation	Ventilation	14,2
	Climatisation	4,2
Essuyage	Avant	4
	Arrière	6
	Côté	2,5
	Dessus	2
Autres	Autoradio	10

Figure 17 : principales consommations électriques du chariot élévateur

On souhaite évaluer l'impact des deux situations extrêmes d'utilisation sur l'autonomie de la batterie :

- chantier journalier estival (seul le groupe « consommateurs permanents » consomme de l'énergie) ;
- chantier hivernal nocturne sous la neige (tous les groupes de la figure 17 consomment de l'énergie).

Afin de ne pas endommager la batterie et de lui garantir une durée de vie importante, on choisit de ne pas la décharger de plus de 10 % de sa capacité nominale. On dit alors que la batterie a une profondeur de décharge de 10 %.

Q18. Déterminer les consommations électriques (en A) pour chaque situation extrême. **En déduire** l'autonomie de la batterie plomb-acide standard de 110 A·h en phase de Stop pour les deux situations extrêmes.

La capacité effective des batteries plomb-acide diminue d'autant plus qu'on la décharge avec un courant important. C'est l'effet Peukert illustré sur la figure 18 page 16.

En situation d'usage normal (non extrême), la consommation électrique moyenne est de 12 A, ce qui conduit à une autonomie de la batterie de 55 minutes pour une décharge de 10 % de la capacité nominale sans prise en compte de l'effet Peukert.

Q19. Déterminer, la capacité effective de la batterie plomb-acide standard si on tient compte de l'effet Peukert. **Indiquer** de combien est réduite l'autonomie de la batterie.

Lors des phases d'arrêt du moteur thermique (fonction Stop), les consommations électriques des différents groupes entraînent une décharge de la batterie. On compte en moyenne trois décharges de 10 % de la batterie par jour.

La durée de vie de la batterie (nombre total de cycles de charge-décharge) est liée à la profondeur de la décharge de chaque cycle (figure 19).

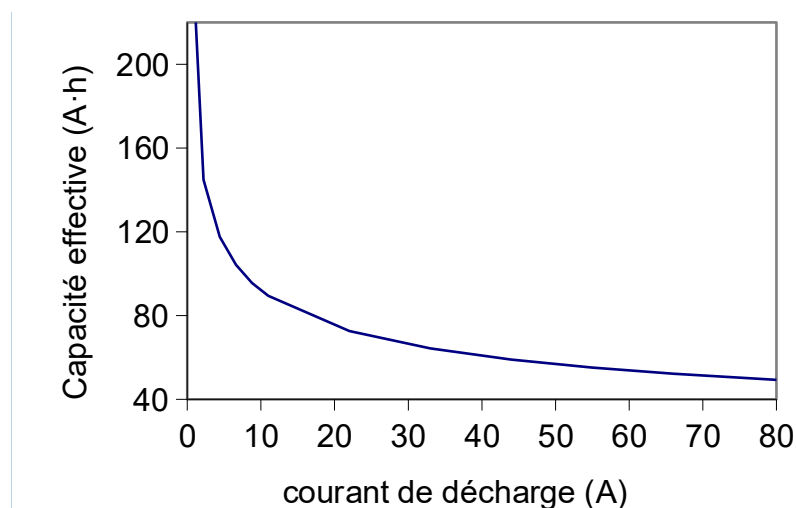


Figure 18 : capacité effective mesurée en fonction du courant de décharge

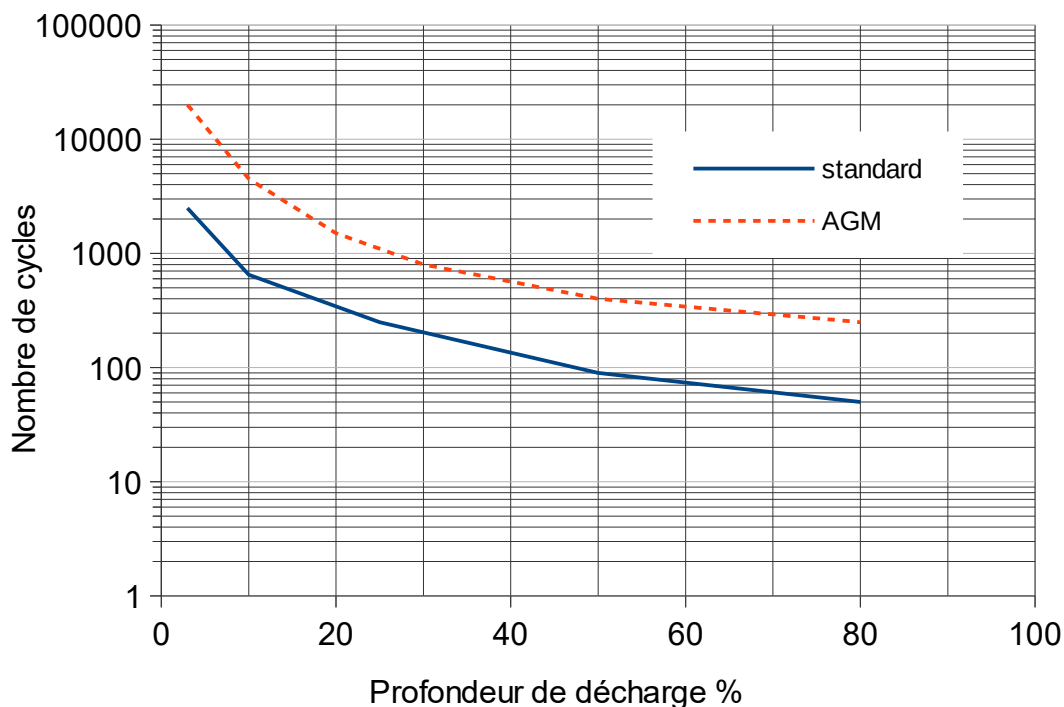


Figure 19 : nombre de cycles d'une batterie plomb-acide en fonction de la profondeur de décharge et de sa technologie (standard ou AGM) – Source : Exide

Q20. À raison de 100 jours d'utilisation par an, **déterminer** la durée de vie de la batterie plomb-acide standard en années à l'aide de la figure 19 page 16. **Analyser** l'écart avec la durée de vie attendue (3 ans) et **conclure** sur le maintien de la batterie plomb-acide standard de 110 A·h sur les chariots avec option Stop&Go.

Le bureau d'étude a fait le choix d'une batterie plomb-acide standard de 180 A·h. Dans les mêmes conditions d'utilisation la décharge est alors de 6 % de la capacité.

Q21. **Conclure** sur la pertinence de ce choix à l'aide de la figure 19 selon les critères d'autonomie et de durée de vie.

5. CONCLUSION

Objectif(s) de cette partie : **proposer** une synthèse de l'étude réalisée.

Q22. En reprenant les points étudiés dans le sujet, **énumérer** les avantages et les inconvénients du système Stop & Go. **Conclure** sur la pertinence du choix de cette option.

Document technique DT1. Décote sur les véhicules d'occasion

Prix neuf (€)	Décote initiale (€)	Ancienneté (années)					
		1	2	3	4	5	6
101 221	65 794	56 254	48 097	41 123	35 160	30 062	25 703

Tableau 1 : valeur actualisée du chariot MT 1840

Coef.	Ancienneté (années)					
	1	2	3	4	5	6
1,05	300	600	900	1 200	1 500	1 800
1,04	400	800	1 200	1 600	2 000	2 400
1,03	500	1 000	1 500	2 000	2 500	3 000
1,02	600	1 200	1 800	2 400	3 000	3 600
1,01	700	1 400	2 100	2 800	3 500	4 200
1	800	1 600	2 400	3 200	4 000	4 800
0,99	900	1 800	2 700	3 600	4 500	5 400
0,98	1 000	2 000	3 000	4 000	5 000	6 000
0,97	1 100	2 200	3 300	4 400	5 500	6 600
0,96	1 200	2 400	3 600	4 800	6 000	7 200
0,95	1 300	2 600	3 900	5 200	6 500	7 800

Tableau 2 : coefficient de correction horaire en fonction du nombre d'heures de fonctionnement du moteur

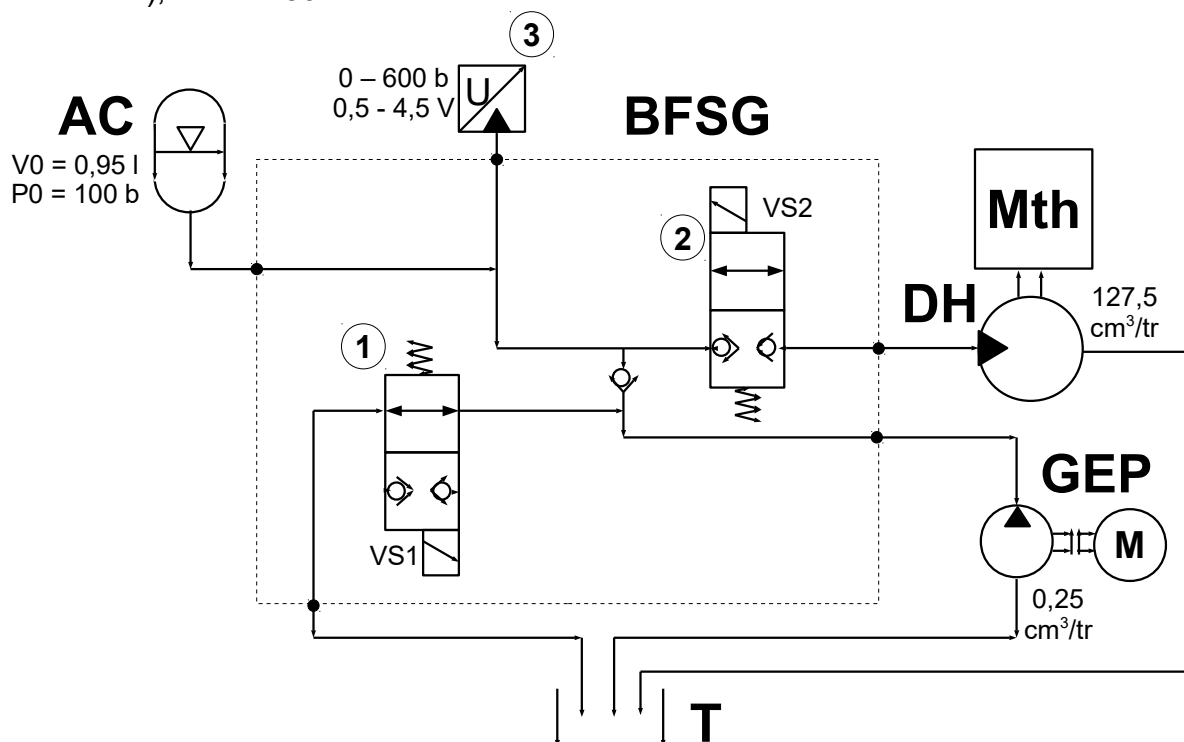
Exemple : pour un chariot de 3 ans avec 3 300 heures de fonctionnement moteur, le coefficient de correction horaire vaut 0,97.

Temps moteur (h)	500	1 000	1 500	2 000	2 500	3 000	3 500	4 000
Coût de maintenance (€)	900	1 200	900	1 500	900	1 200	900	1 500

Tableau 3 : coût des entretiens programmés

Document technique DT2. Schéma hydraulique simplifié

La pression maximale dans ce circuit est limitée par un limiteur de pression (non représenté ici), taré à 250 bars.



Les électrovannes sont représentées à l'état repos

BFSG : bloc de fonctions hydrauliques.

- ① électro-vanne VS1 : charge l'accumulateur hydraulique.
- ② électro-vanne VS2 : décharge l'accumulateur hydraulique vers le démarreur hydraulique pour lancer le moteur thermique.
- ③ capteur de pression : information sur la pression de l'accumulateur.

AC : accumulateur hydraulique.

DH : démarreur hydraulique du moteur thermique **Mth**.

GEP : groupe électro-pompe.

T : réservoir d'huile.

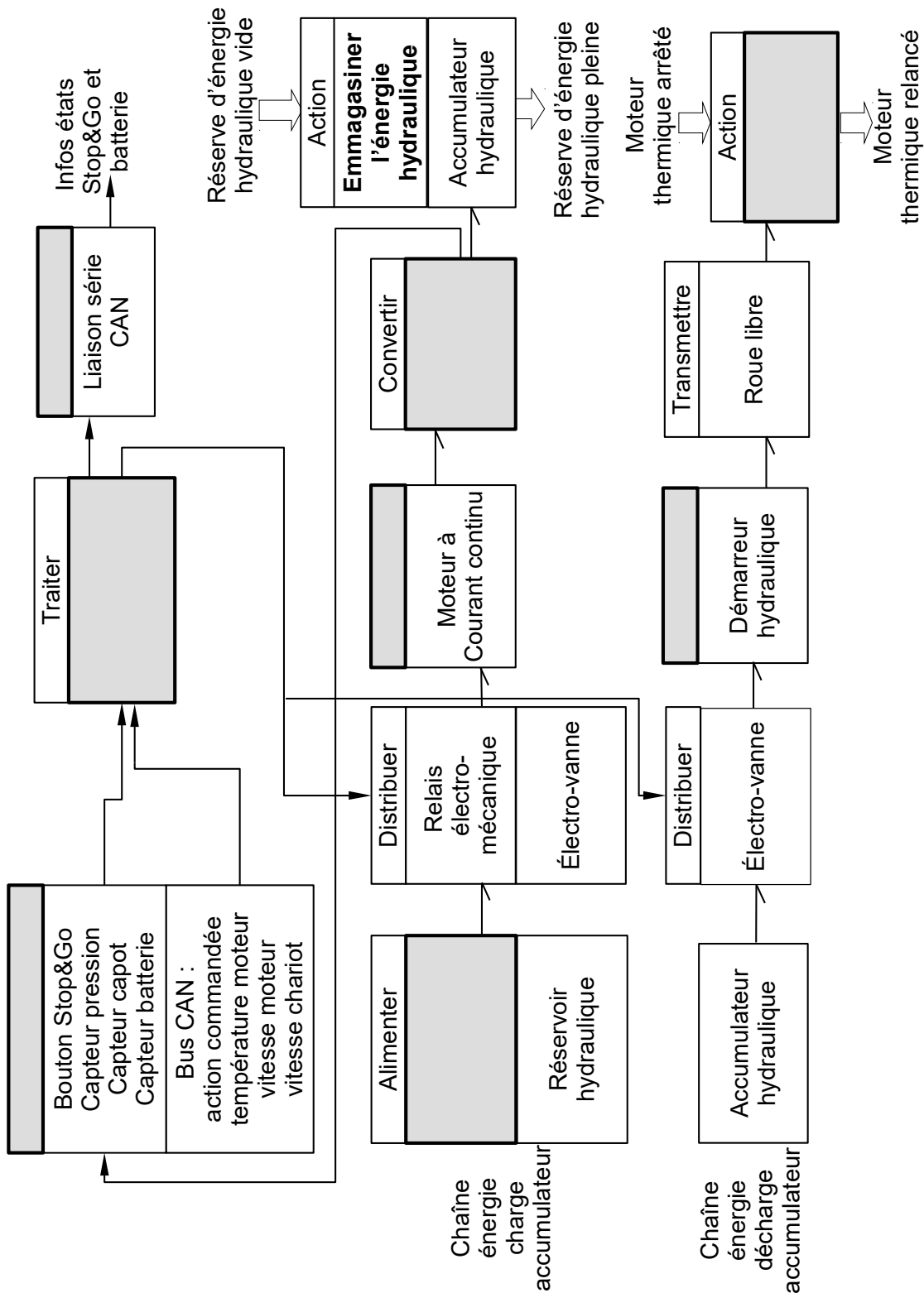
Fonctionnement

- Accumulateur en phase de chargement : VS1 pilotée et VS2 au repos. Démarrage de la pompe hydraulique (GEP) avant l'activation de VS1.
- Accumulateur chargé : VS1 et VS2 sont au repos.
- Accumulateur en phase de déchargement dans le démarreur hydraulique : VS1 au repos et VS2 pilotée.

À rendre avec la copie

Document réponse DR1. Chaîne d'information et d'énergie

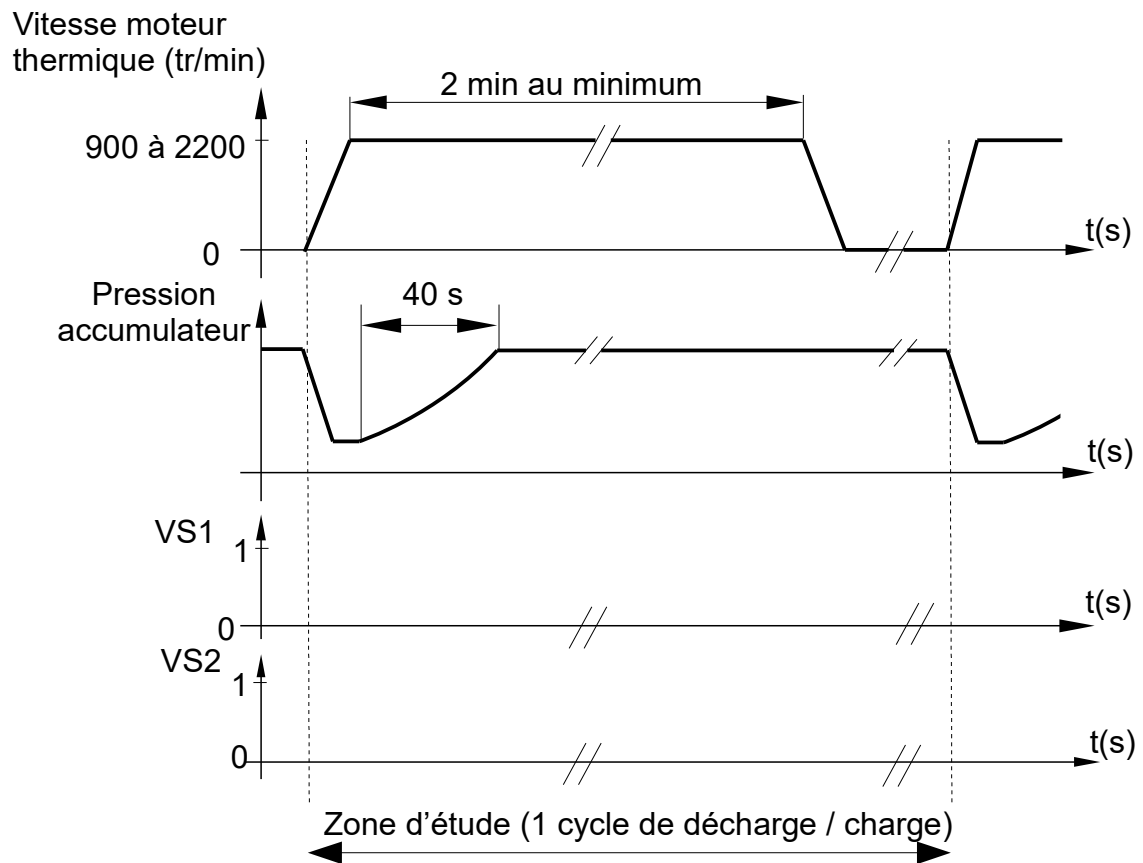
Question 11



À rendre avec la copie

Document réponse DR2. Circulation hydraulique

Question 12 - Chronogramme de pilotage des électrovannes VS1 et VS2.

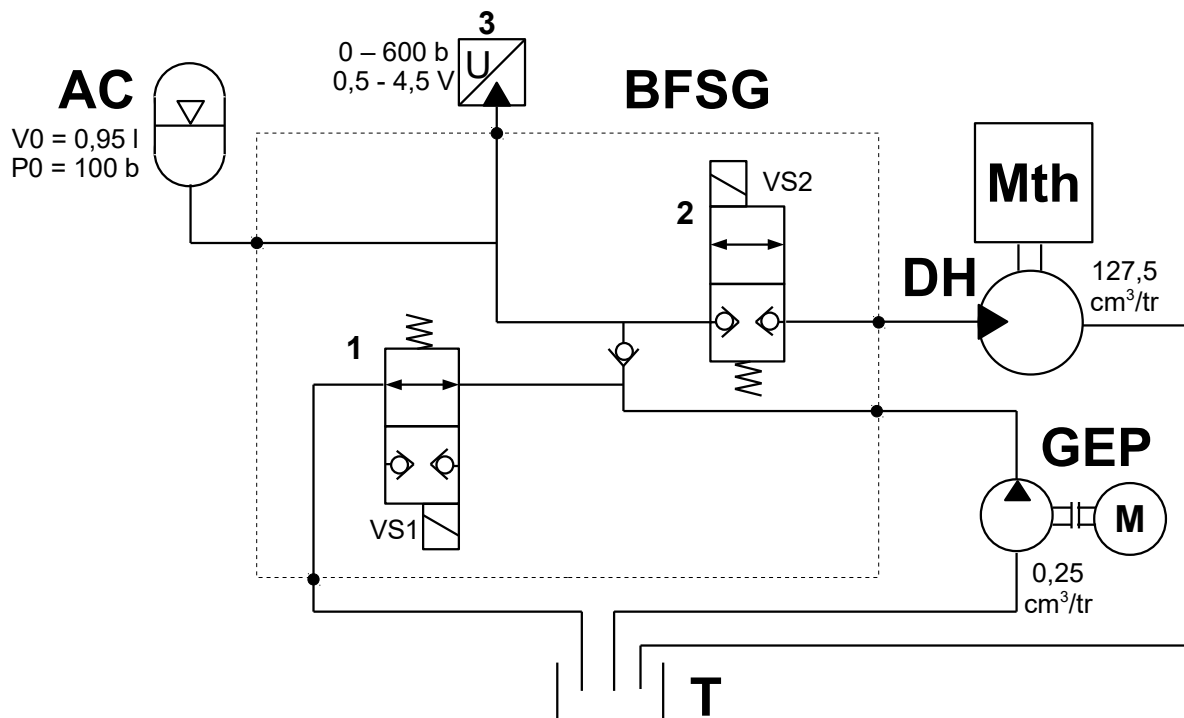


À rendre avec la copie

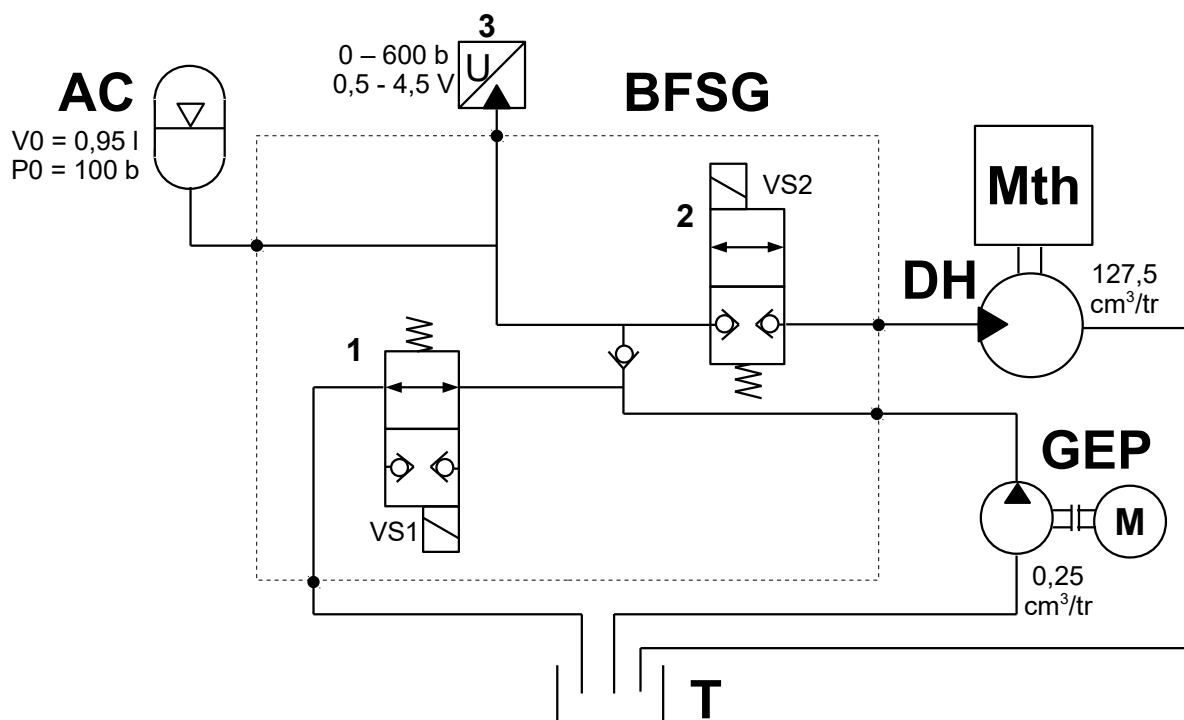
Document réponse DR3. Schéma hydraulique

Question 13

a - Circulation du fluide en **recharge** de l'accumulateur



b - Circulation du fluide en phase de **décharge** de l'accumulateur



À rendre avec la copie

Document réponse DR4. Flux d'énergie

Question 14 – Caractérisation des flux d'énergie. $S_1 \xrightarrow[e(t)]{f(t)} S_2$

point	1	2	3	4	5
Expression de la puissance	P1 =	P2 =	P3 =	P4 =	P5 =
effort e(t)					
flux f(t)					

Notation des éléments à mettre dans le tableau avec les unités S.I. correspondantes :

	Notation
débit	Q
couple	C
courant	I
force	F
pression	P
tension	U
vitesse	V
vitesse	ω