

CONCOURS GÉNÉRAL DES LYCÉES

—

SESSION 2020

—

SCIENCES DE L'INGÉNIEUR

(Classes de terminale S)

Durée : 5 heures

—

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

Consignes aux candidats

- Ne pas utiliser d'encre claire
- N'utiliser ni colle, ni agrafe
- Numérotter chaque page en bas à droite (numéro de page / nombre total de pages)
- Sur chaque copie, renseigner l'en-tête + l'identification du concours :

Concours / Examen : CGL

Epreuve : 101

Matière : SCIN

Session : 2020

CONCOURS GÉNÉRAL DES LYCÉES

Session 2020

Sciences de l'ingénieur

Durée : 5 heures



Constitution du dossier

- texte (mise en situation et questionnement), pages 2 à 22 ;
- documents réponses DR 1 à DR 8, pages 23 à 27.

Conseils au candidat

Vérifier que tous les documents définis ci-dessus sont présents. La phase d'appropriation d'un système pluri-technologique passe par la lecture attentive de l'ensemble du sujet. Il est fortement conseillé de consacrer au moins 30 minutes à cette phase indispensable de découverte.

Les documents réponses DR 1 à DR 8 sont à rendre agrafés avec la copie, même s'ils n'ont pas été complétés.

1 Présentation du contexte de l'étude

1.1 Présentation du projet « Grand Paris »

Le Grand Paris est un projet visant à transformer l'agglomération parisienne en une grande métropole mondiale du XXI^e siècle, afin d'améliorer le cadre de vie des habitants, de corriger les inégalités territoriales et de construire une ville durable. La Société du Grand Paris est un établissement public chargé de créer un nouveau métro automatique (« Grand Paris Express », 200 km de voies et 75 gares, évalué à 32,5 milliards d'euros) dans la banlieue parisienne. Or, Paris représente déjà 12 millions d'habitants sur 105 km². Il s'agit de la plus importante densité de population en Europe. La proximité de ces chantiers avec ces zones de très fortes densités est un enjeu majeur.

Les chantiers prévus vont créer d'importants flux de matériaux de construction, de camions et de déchets. Ainsi, pour la seule construction de 200 km de nouvelles lignes de métro en rocade périphérique et de 68 gares nouvelles, 43 millions de tonnes de déblais devraient être extraites en 15 ans environ, de 2016 à 2030. Le chantier du Grand Paris Express s'est doté d'une charte de chantier à faibles nuisances visant une meilleure gestion des déchets, mais aussi la réduction des bruits, la limitation des émissions de CO₂, la maîtrise de la perturbation du trafic etc.

1.2 Problématique générale du sujet

Cette étude porte sur les exigences définies par la charte de chantier à faibles nuisances du Grand Paris Express et de leurs impacts sur les choix de conception d'un engin de travaux publics. Ces exigences sont décrites dans la figure 1. Le sujet se compose donc de quatre thématiques principales :

- description et évaluation des nuisances induites par les chantiers urbains (ID = "1.4"), parties 2 et 3 ;
- étude de la conception d'engins de travaux publics au regard des performances métier (ID = "1.2"), partie 4 ;
- validation d'un choix de conception vis-à-vis de la performance énergétique (ID = "1.3"), partie 5 ;
- modélisation et validation d'une chaîne d'asservissement pour la sécurité (ID = "1.1"), partie 6.

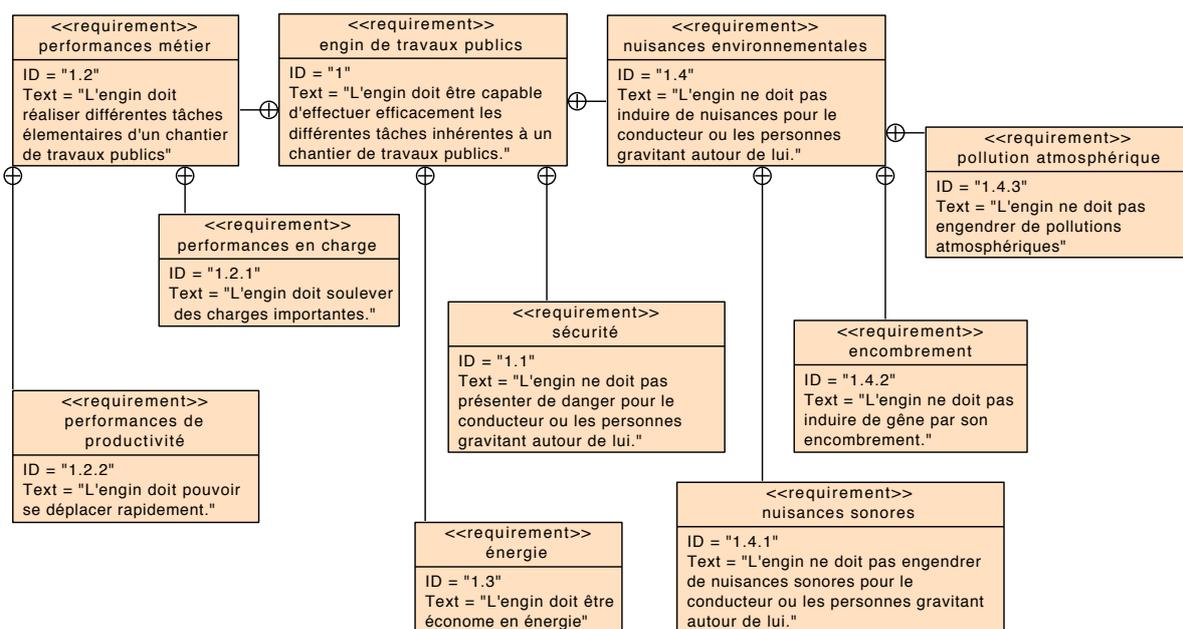


Figure 1 – diagramme des exigences d'un engin de travaux public

2 Nuisances induites par les chantiers urbains (ID = "1.4")

Objectif _____

Évaluer les nuisances d'un chantier urbain au regard des nouveaux labels environnementaux.

2.1 Nuisances dues au bruit

Pour un chantier, on se trouve généralement confronté à plusieurs sources sonores fonctionnant simultanément. Certaines sont mobiles, avec un trajet variable (chargeurs, pelles, camions...), d'autres fixes (centrales à béton, d'enrobage, groupes électrogènes, motocompresseurs...). Cependant, ces chantiers peuvent se décomposer, dans la majorité des cas, en cycles de fonctionnement pouvant comprendre une ou plusieurs phases distinctes (figure 2). À l'intérieur d'un cycle, il existe plusieurs phases de travail :

- déchargement des matériaux ;
- ouverture de la tranchée à l'aide d'une pelle avec chargement des matériaux dans un camion ;
- creusement du fond de la tranchée à l'aide d'un marteau piqueur ;
- sablage de la tranchée ;
- manutention ;
- remblais de la tranchée et pose de bordure ;
- départ du camion (tous les 5 cycles).

Le cycle reprend ensuite par l'ouverture de la tranchée à un endroit plus éloigné. Le remplissage de la tranchée, le nivelage et le compactage se font en continu, à un autre moment, lorsqu'il y a suffisamment de buses posées.

La quantification du bruit émis par les chantiers se fait en niveaux LAeq (niveaux énergétiques moyens) pour les périodes de référence de jour (7 h – 20 h) et de nuit (20 h – 7 h).

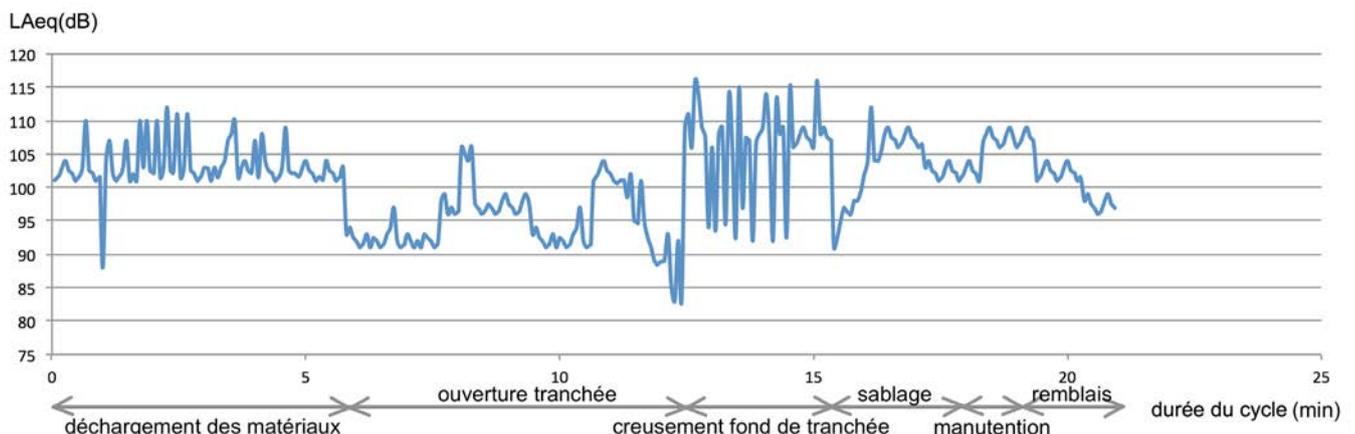


Figure 2 – relevé de pression acoustique sur un chantier de travaux publics sur une durée de 20 min

Q1 - Quelle est la valeur moyenne du niveau équivalent de bruit en dB sur un cycle de travail ? En considérant en première approximation que ce cycle est répété sur une journée de 8 h, au regard des prescriptions de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) (figure 1), cette valeur est-elle admissible pour un chantier de jour ?

niveau sonore	durée maximale d'exposition par jour
85 dB	8 heures
88 dB	4 heures
91 dB	2 heures
94 dB	1 heure
97 dB	30 minutes
100 dB	15 minutes

Tableau 1 – limites acceptables d'exposition au bruit définies par l'OMS

Afin de diminuer les nuisances sonores, il existe différentes solutions. Considérons le chantier « type » évoqué précédemment : trois engins sont sources de bruit (tableau 2). Chacun de ces engins engendre en un point donné un niveau sonore constant lorsqu'il fonctionne, noté L_i . La durée cumulée de fonctionnement d'un engin est notée T_i , par journée de travail de 8 heures.

	engin	L_i (dB)	T_i (h)
1	pelle	106	5,2
2	marteau piqueur	113	1,8
3	camion	101	4,3

Tableau 2 – niveau sonore et durée de la nuisance pour différents engins

Le niveau sonore moyen sur une journée est donné par la relation suivante :

$$L_{eq} = 10 \times \log \left(\frac{1}{T_{TOT}} \sum_{i=1}^n T_i \times 10^{\frac{L_i}{10}} \right)$$

Q2 - Calculer le niveau sonore L_{eq} (pour une journée de 8 heures). Lequel des trois engins a la plus grande contribution au L_{eq} ? Sans préjuger de la faisabilité, sur quels paramètres peut-on agir pour diminuer le niveau sonore global du chantier ?

Q3 - L'objectif de confort étant un bruit résiduel de 72 dB, d'après le tableau 3, quels EPI (Équipement de Protection Individuel) permettent de protéger efficacement le salarié sur une durée de chantier de huit heures ?

2.2 Nuisances dues à l'encombrement

La mauvaise gestion des flux autour des chantiers urbains reste une des principales gênes aux riverains. Les travaux peuvent réduire de façon temporaire la capacité d'un tronçon routier et influencer son trafic ainsi que celui du réseau local à proximité en raison des éventuels reports.

Du 16 au 19 septembre 2018, une étude sur un tronçon témoin d'une rue de banlieue parisienne a permis d'étudier l'impact sur le débit de véhicules (exprimé en UVP/h, Unités de Véhicules Particuliers par heure) lors de leur immobilisation par une pelle mécanique de 12 tonnes pendant un chantier de mise en place de fibre optique.

EPI	atténuation en dB
casque à coquilles	35
bouchons avec arceau	26
bouchons d'oreilles	35
bouchons sur mesure	33

Tableau 3 – niveaux de protection pour les équipements de protection individuels standards

Dans un premier temps, la pelle n'immobilise qu'une voie, n'ayant pas à empiéter sur la seconde pour travailler. Il s'agit d'une circulation alternée classique voie 1 / voie 2 afin de garantir un écoulement régulier des véhicules sens 1 / sens 2. Dans un deuxième temps, la pelle doit, du fait de sa taille, empiéter plusieurs fois sur la seconde voie, engendrant l'arrêt total de la circulation.

Les temps de parcours moyens sur le tronçon considéré ont été mesurés dans ces deux cas :

- en circulation alternée classique, 9 min 30 s (sens 1) et 9 min 05 s (sens 2) ;
- en circulation alternée impactée par l'immobilisation d'une deuxième voie, 18 à 19 min selon les longueurs de bouchons observées.

Le tableau suivant donne le nombre d'heures perdues pour l'ensemble des utilisateurs la seule journée du jeudi 19 septembre (jour ouvrable « moyen ») (tableau 4).

	temps perdu véhicules légers (h)	temps perdu poids lourds (h)	total (h)
sens 1	829	190	1019
sens 2	612	63	675
total	1441	253	1694

Tableau 4 – temps perdu par les usagers en heures

À partir des coûts unitaires définis dans les méthodes françaises d'évaluation économique, cette gêne peut être monétarisée :

- coût global de l'heure pour un véhicule léger, 25 €/h ;
- coût global de l'heure pour un poids lourd, 41,5 €/h.

Q4 - Quel est le coût collectif journalier occasionné par la gêne au trafic ? Quel est le coût collectif pour un chantier de 4 jours ? Quels sont les deux leviers pour réduire le coût global d'un chantier urbain ?

Une modélisation du trafic à partir de données statistiques a pu être réalisée afin de prévoir la formation de bouchons en amont du chantier. La figure 3, qui indique le nombre d'UVP/h (unités de véhicules particuliers/ heure en fonction de l'heure de la journée), permet de comparer les résultats de la simulation du trafic aux comptages réels effectués sur chantier.

Q5 - Les résultats expérimentaux permettent-ils de valider le modèle ? Comment expliquer les écarts importants entre le modèle et les résultats expérimentaux pour la journée du 18 septembre ? En quoi est-il avantageux d'établir un modèle pour la formation de bouchons ?

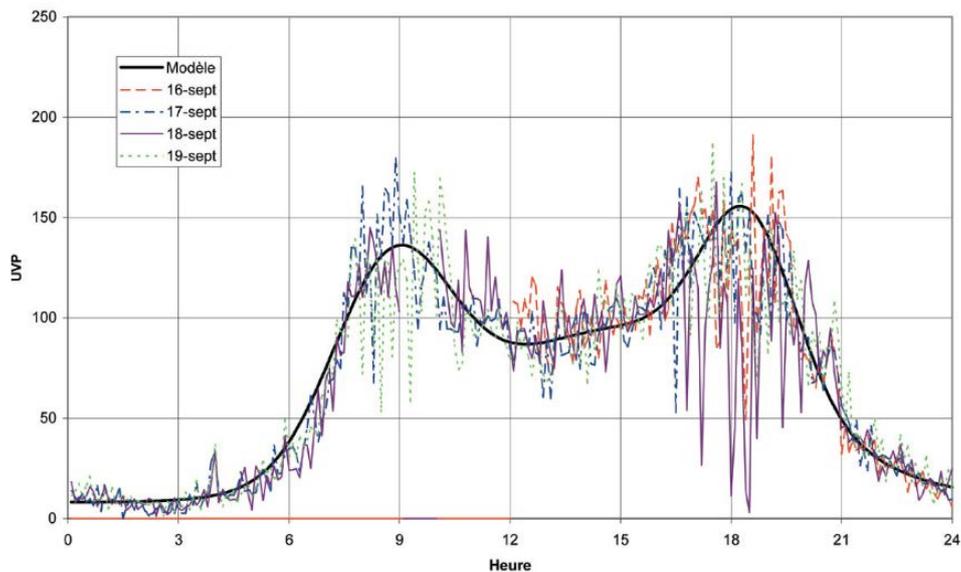


Figure 3 – modélisation et comptage d’UVP du 16 au 19 septembre

2.3 Nuisances dues aux polluants et gaz à effet de serre

Les différentes activités liées à la réalisation de chantiers sont sources de pollution atmosphérique, dont la nature varie selon le poste d’émission. Dans le cadre des chantiers de travaux publics, deux grandes catégories de polluants atmosphériques existent : les gaz et les particules. Selon l’Office Mondial de la Santé, la pollution de l’air représente un risque environnemental majeur pour la santé. Dans l’optique de mieux contrôler ces émissions et d’orienter les actions correctives, des cartographies sont réalisées régulièrement, ici en Île-de-France (figure 4).

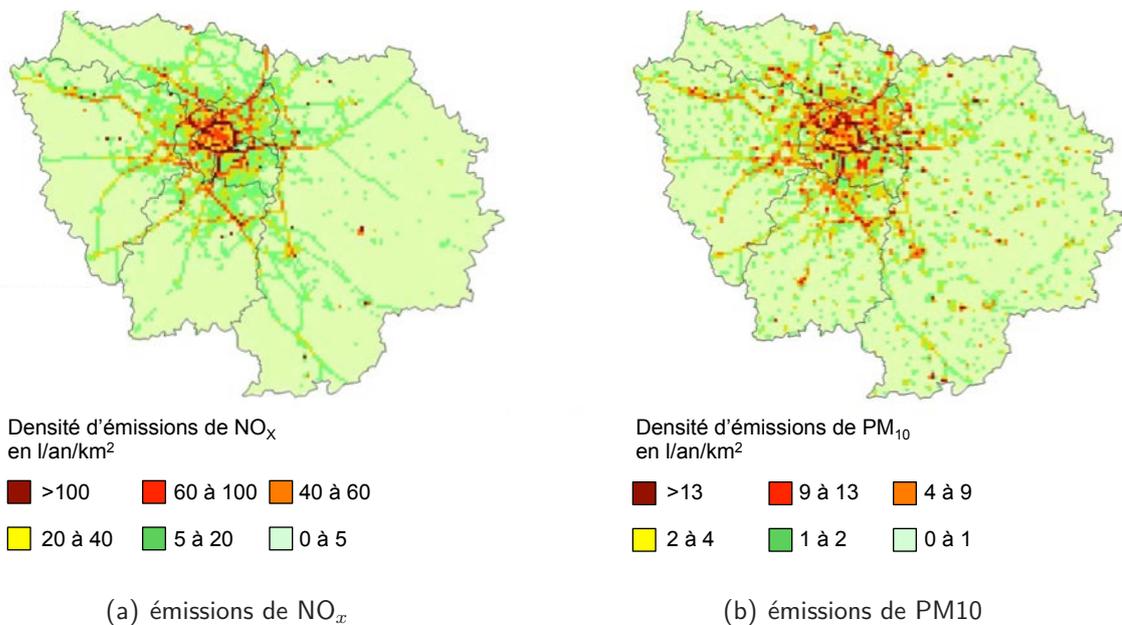


Figure 4 – émissions de polluants et gaz à effet de serre en région Île-de-France

Les oxydes d’azotes (NO_x) correspondent à la somme des émissions de monoxyde d’azote (NO) et de dioxyde d’azote (NO₂) exprimés en équivalent NO₂. Les particules fines en suspension (caractérisées par les paramètres PM₁₀ et PM_{2,5}) peuvent véhiculer des substances toxiques capables de passer la barrière

air/sang au niveau des alvéoles pulmonaires. Les concentrations de particules en suspension PM_{10} et $PM_{2,5}$ dans l'air sont réglementées.

Q6 - Quelles sont les zones particulièrement exposées aux émissions de NO_x et de particules ? En quoi les chantiers de travaux publics sont-ils contributeurs de ces problèmes spécifiquement dans ces zones ?

Afin de lutter contre ces émissions et leurs conséquences sanitaires, les normes antipollution en vigueur pour les moteurs non routiers deviennent de plus en plus drastiques. Depuis 1996, dans le but de contraindre les motoristes, le ministère de l'environnement a mis en place des classes de dépollution (figure 5). Elles définissent le niveau maximal d'émission du couple NO_x/PM autorisé pour un moteur. Les étapes (stages) 1 à 5 correspondent aux évolutions de ses classes de dépollution entre 1996 et 2019.

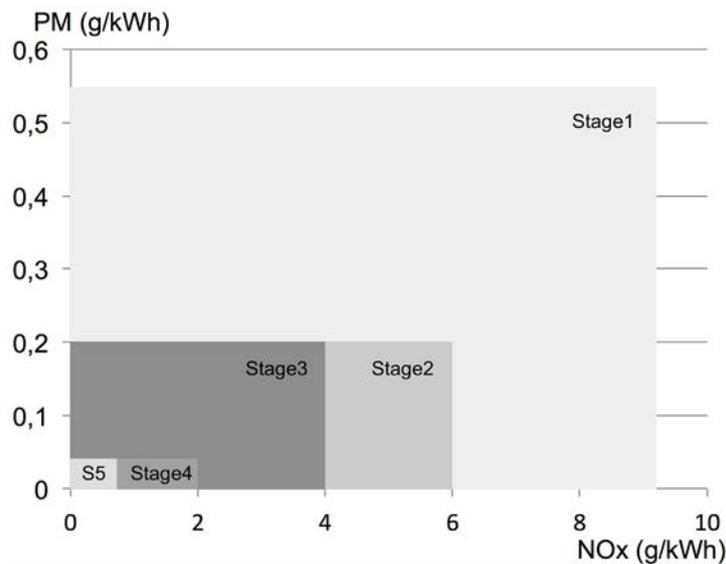


Figure 5 – taux d'émission maximaux autorisés des moteurs diesel pour les différentes normes de dépollution

Q7 - On calcule le taux global d'émission d'un moteur diesel comme le produit des taux d'émission de NO_x et de PM . Calculer ces taux globaux d'émission de NO_x et de PM pour un moteur *Stage 1* et un moteur *Stage 5*. Combien de moteurs répondant à la norme *Stage 5* produisent l'équivalent d'un moteur répondant à la norme *Stage 1* en termes d'émission ? Quelles sont les solutions technologiques que peuvent choisir les industriels afin de réduire les émissions de leurs moteurs ?

2.4 Synthèse

La charte de chantier à faibles nuisances du Grand Paris Express induit des contraintes fortes sur les impacts des chantiers urbains sur leurs environnements et notamment sur les engins utilisés. Trois nuisances principales ont été identifiées : celles dues au bruit, à l'encombrement et aux polluants atmosphériques. Elles engendrent donc sur les engins de chantiers des exigences spécifiques, recensées sur le diagramme ci-dessus, au même titre que les exigences métiers.

Q8 - Proposer une synthèse sous la forme d'un tableau présentant pour chaque nuisance étudiée l'impact d'un chantier urbain et les possibilités d'amélioration de ces impacts.

3 Performances environnementales d'un engin de travaux publics (ID = "1.4")

Objectif _____

Déterminer et comparer les performances environnementales d'un engin multifonction, d'une pelle standard et d'une chargeuse standard.

3.1 L'engin de chantier e12

Spécialisée dans la conception d'engins de chantiers urbains, l'entreprise Mecalac a développé un nouveau modèle caractérisé par une motorisation 100 % électrique et une cinématique à six degrés de liberté : l'engin multifonction e12 (figure 6).

Dans la suite de l'étude, il sera vu en quoi sa motorisation et sa chaîne cinématique innovantes permettent de répondre aux exigences fixées par la charte de chantier du Grand Paris Express.



Figure 6 – engin multifonction e12

3.2 Performances environnementales : pollution atmosphérique ID = "1.4.3" et nuisances sonores ID= "1.4.1"

Le bruit au passage d'un véhicule est constitué de deux composantes principales : le bruit dû au groupe motopropulseur et le bruit de roulement, ce dernier étant lié au contact des pneumatiques roulant sur la chaussée. La figure 7 décrit les différentes contributions au niveau sonore global d'un engin pour un moteur thermique, un moteur électrique et le roulement des pneumatiques sur le sol.

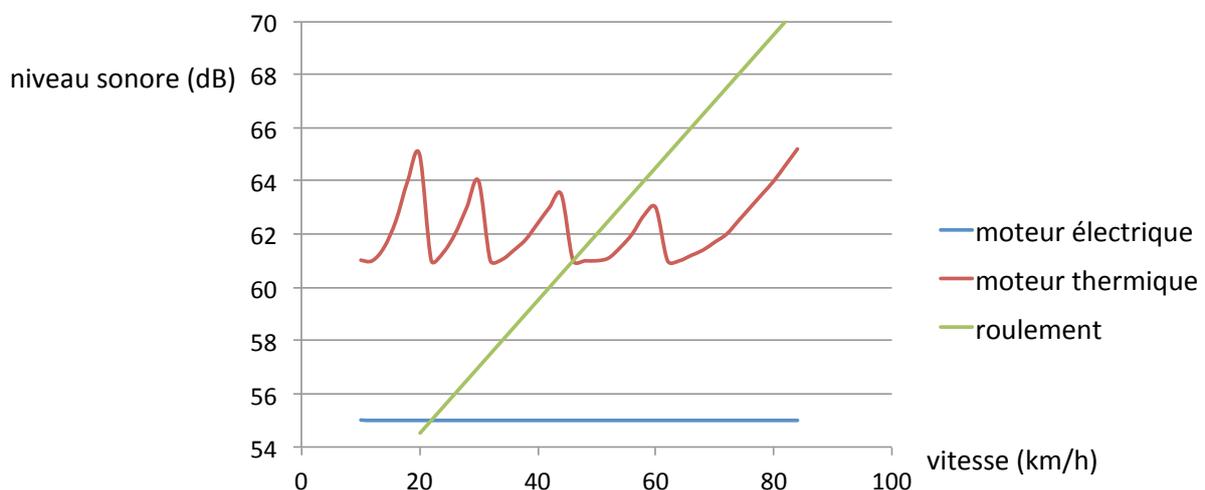


Figure 7 – contributions aux niveau sonore global d'un engin

Q9 - En dessous de 20 km/h (vitesse maximale autorisée sur un chantier), quelle est la composante prépondérante pour un engin équipé d'un moteur thermique ? Quelle est la composante prépondérante pour un engin équipé d'un moteur électrique ? Expliquer en quoi une motorisation électrique permet de mieux satisfaire les exigences liées aux nuisances sonores.

Q10 - Une motorisation électrique émet-elle des polluants atmosphériques ?

4 Performances métier d'un engin de travaux publics (ID = "1.2")

Au cours d'un chantier de travaux publics, en fonction du type de chantier, quatre tâches élémentaires peuvent être réalisées :

- creuser (exemple, ouvrir une tranchée) ;
- charger (exemple, charger un tas de gravas dans un camion pour évacuation) ;
- manutentionner (exemple, déplacer une palette de matériaux) ;
- porter des outils dédiés (exemple, porter une niveleuse).

Les engins « classiques » sont spécialisés sur une de ces tâches (Figure 8), leurs cinématiques, en générale très simples, ne leur permettent pas de réaliser l'ensemble des mouvements associés aux différentes tâches.

				
Tâche	creuser	charger	manutentionner	porter des outils
Engin	pelle	chargeuse	chariot élévateur	tracteur

Figure 8 – tâches élémentaires à effectuer et engins spécialisés

Aujourd'hui en phase de présérie, l'engin e12 est capable, grâce à une chaîne cinématique particulière, d'effectuer ces quatre tâches élémentaires (figure 9).



Figure 9 – différentes tâches effectuées par l'engin e12

Objectif _____

Comparer les performances métier de l'engin e12 par rapport à deux engins spécialisés : une pelle mécanique et une chargeuse.

Une pelle et une chargeuse ont des cinématiques radicalement différentes et donc des usages différents. La pelle hydraulique est constituée d'un châssis porteur à chenilles ou à pneus, surmonté d'une tourelle dotée d'une rotation continue sur 360 degrés. Cette tourelle porte le moteur, les organes hydrauliques (pompe, moteurs, vérins), le poste de conduite et l'équipement (bec de flèche, flèche, bras et godet – voir figure 10). Sa cinématique permet de creuser, godet orienté vers l'arrière de la machine.

Une chargeuse comporte, quant-à-elle, un corps automoteur articulé et un godet à l'avant qui peut effectuer un mouvement vertical et pivoter autour de son axe porteur. Les imposantes roues de la chargeuse sont

mues par un moteur puissant qui impose une poussée importante au godet orienté vers l'avant. Il est donc utilisé pour des opérations de chargement de matériaux stockés au sol.

Dans cette partie, il s'agira de comparer les performances de l'engin e12 à celles de ses concurrentes directes, la pelle mécanique standard et la chargeuse standard selon les critères de performance métier. Les exigences pour un engin de travaux publics ont été vues dans le diagramme des exigences (figure 1).

4.1 Exigence ID = "1.2.1" : performances en charge

Objectif _____

Déterminer et comparer les performances statiques en levage des engins e12 et d'une pelle standard.

Sur un chantier urbain, l'ouverture de tranchée est une opération classique et fréquente. L'engin dédié à cette tâche est une pelle mécanique. Ici, seront comparés l'engin polyvalent e12 et la pelle standard. Afin de dimensionner les éléments hydrauliques, deux cas sont considérés :

- levage en charge, godet plein et au plus de loin de la machine ;
- levage en charge, godet plein et au plus près de la machine.

Le levage dans l'axe, qui est le cas le plus fréquent pour un engin de type pelle est étudié ici.

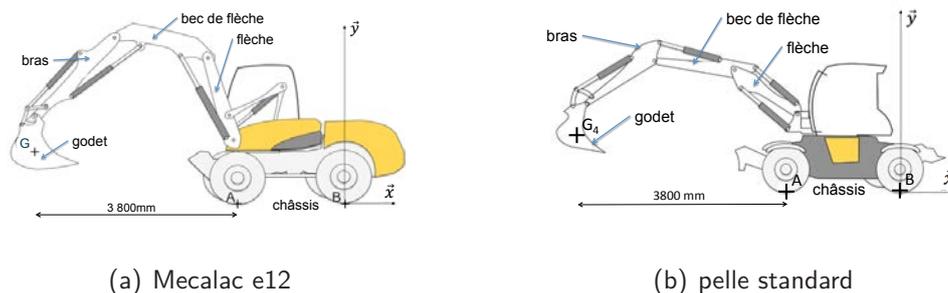


Figure 10 – positions des pelles au plus loin de la machine

Une étude plane (B, \vec{x}, \vec{y}) , réalisée dans le cas le plus défavorable, bras déployé au maximum (figure 10), a permis de déterminer les moments en A dus à la pesanteur sur les différents éléments de chacune des pelles hormis le godet. Il sont recensés dans le tableau 5 ci-après. Les masses des vérins et autres éléments d'articulation sont négligées devant celles des pièces de structure.

Q11 - Quelle est la condition sur \vec{R}_B (résultante de l'action mécanique du sol sur la roue arrière en B) pour éviter le basculement de l'engin ? Quelle est la masse maximale M_4 du godet chargé (4) (voir tableau 5) que chaque engin peut soulever dans cette position avant basculement ?

Dans la deuxième position, dite « au plus près de la machine », le basculement n'est plus le facteur prépondérant de dimensionnement. Ici, il s'agit de connaître la limite hydraulique des groupes moto-pompes. Les efforts mis en œuvre et les vitesses des tiges ont été relevés sur l'ensemble des vérins dans le cas d'un levage en limite de charge. Les mouvements des bras pour cette opération sont précisés figure 11. Les résultats des relevés, ainsi que les dimensions du vérin de flèche sont donnés dans le tableau 6. Pour réduire les temps de cycle, un ouvrier qualifié actionnera les quatre vérins en même temps.

		e12	pelle standard
châssis (ch)	$\vec{M}(A, \text{pes} \rightarrow \text{ch}) \cdot \vec{z}$	-37 000	-74 000
flèche (fl)	$\vec{M}(A, \text{pes} \rightarrow \text{fl}) \cdot \vec{z}$	3 847	3 705
bec de flèche (be)	$\vec{M}(A, \text{pes} \rightarrow \text{be}) \cdot \vec{z}$	12 395	10 887
bras (br)	$\vec{M}(A, \text{pes} \rightarrow \text{br}) \cdot \vec{z}$	18 975	18 925
godet chargé (go)	$\vec{M}(A, \text{pes} \rightarrow \text{go}) \cdot \vec{z}$	à calculer	à calculer
batteries e12 (ba)	$\vec{M}(A, \text{pes} \rightarrow \text{ba}) \cdot \vec{z}$	-108 900	0

Tableau 5 – moments en A de la pesanteur sur les différents éléments de chaque pelle en $\text{N} \cdot \text{m}$

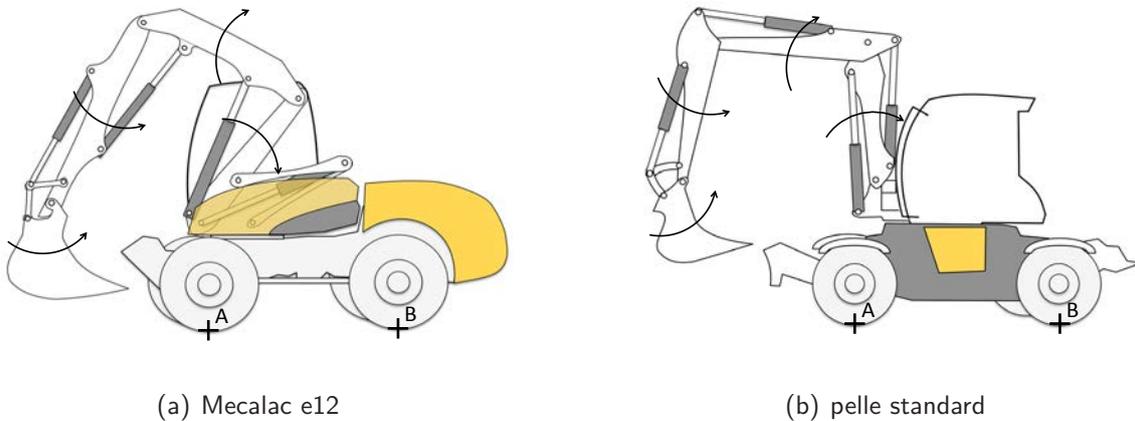


Figure 11 – positions « au plus près de la machine »

Une première étude a notamment permis de déterminer les pressions et les débits dans les vérins utilisés pour déplacer le bec de flèche, le bras et le godet (tableau 7).

	e12				pelle standard			
vérin	F	V	D piston	D tige	F	V	D piston	D tige
flèche	657 kN	0,05 m/s	160 mm	90 mm	450 N	0,07 m/s	120 mm	70 mm

Tableau 6 – effort, vitesse de tige et diamètres du vérin de flèche pour les deux engins

Q12 - Calculer la pression dans le vérin de flèche en précisant si celui-ci est en rentrée ou en sortie de tige pour les deux engins. En déduire la pression de travail de la pompe à cet instant pour les deux engins.

Q13 - Calculer le débit de la pompe nécessaire au déplacement simultané des quatre vérins. En déduire la puissance fournie à la pompe pour chaque engin, en considérant un rendement global égal à 0,6.

vérin	engin e12		pelle standard	
	pression (bar)	débit (L/min)	pression (bar)	débit (L/min)
bec de flèche	343	45	317	42
bras	313	33	253	40
godet	216	27	198	32

Tableau 7 – pressions en bar et débits en L/min calculés dans les vérins pour les deux engins

4.2 Exigence ID = "1.2.3" : performances de productivité

Objectif _____

Déterminer et comparer les performances de productivité des engins e12, pelle standard et chargeuse standard au cours de leurs tâches de références respectives.

4.2.1 Évaluation de la fonction chargeuse

Un chargement s'effectue comme suit : mise en place du godet devant le tas, pénétration horizontale du godet dans le tas, cavage (inclinaison du godet pour éviter que le matériau n'en retombe), soulèvement à hauteur de benne, mise en place du godet au-dessus de la benne, inclinaison du godet pour remplissage de la benne, retour en position du godet.

De part sa cinématique générale, l'engin e12 permet de faire du chargement statique, c'est-à-dire sans déplacer la machine, là où les chargeuses classiques doivent effectuer une manœuvre pour se mettre dans l'axe d'abord du tas de matériau à charger puis dans celui du camion. De fait, les fonctionnements des deux machines seront différents. Les chronogrammes ci-dessous (figures 12 et 13) ont été élaborés sur la base d'une observation sur site.

Q14 - Déterminer le temps d'un cycle de chargement pour l'engin e12 et la chargeuse. En déduire le gain de temps pour le chargement d'une benne 26 tonnes avec de la terre végétale de masse volumique 1250 kg/m³. Le volume du godet est égal à 1000 L.

4.2.2 Évaluation de la fonction pelle

Pour cette exigence de productivité, les performances des deux pelles seront considérées comme très proches du fait de leurs cinématiques presque identiques.

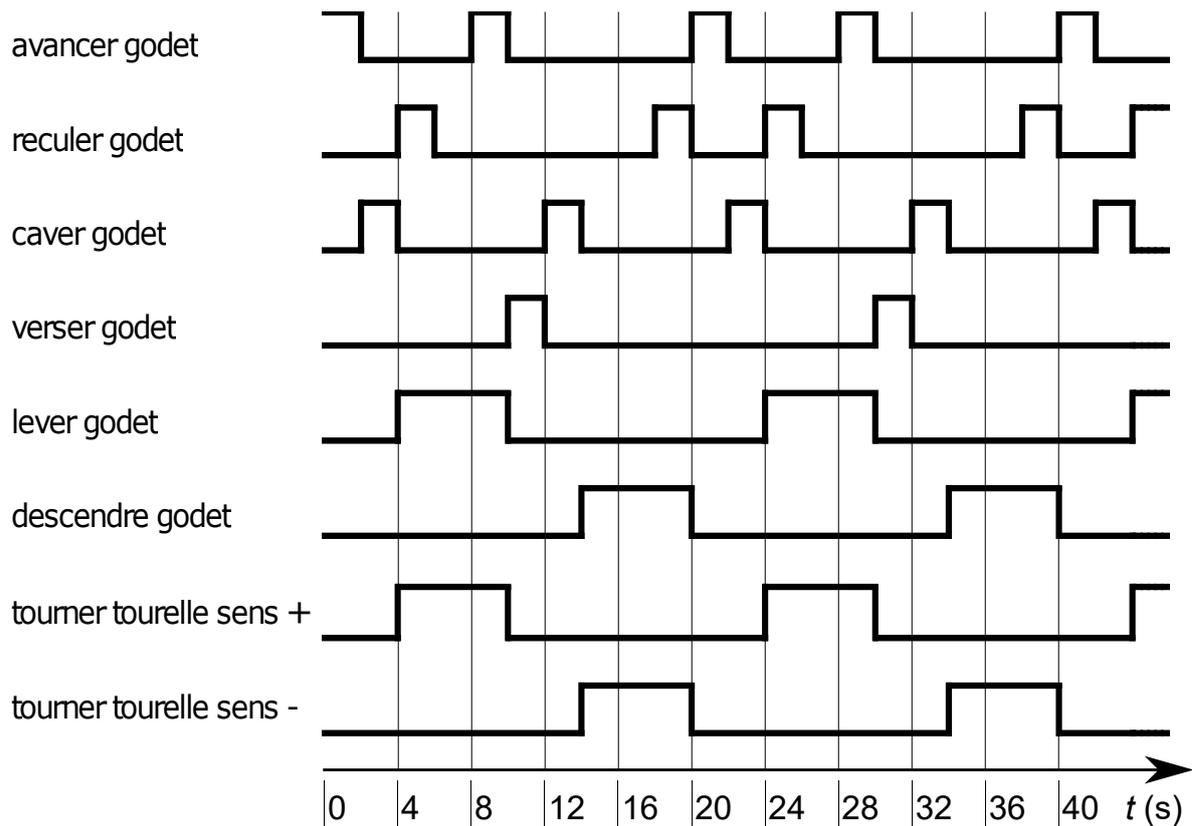


Figure 12 – chronogrammes du fonctionnement de l'engin e12 en chargement

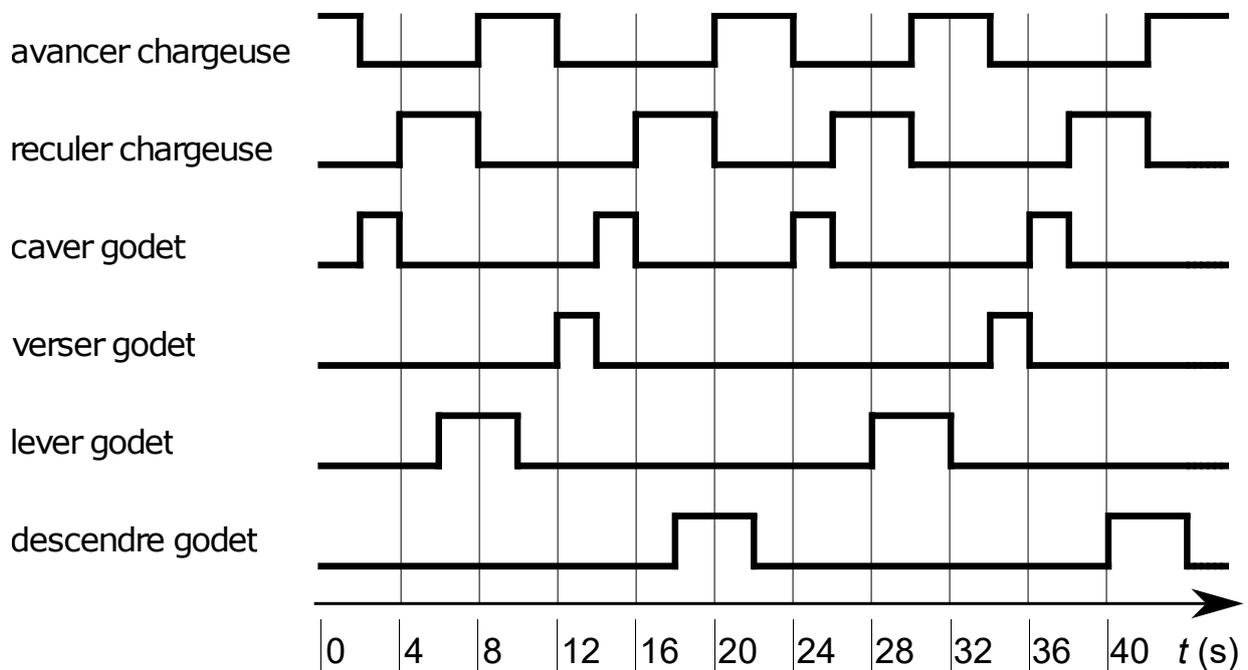


Figure 13 – chronogrammes du fonctionnement de la chargeuse en chargement

4.3 Synthèse

Q15 - Proposer une synthèse (10 lignes au maximum) sur les avantages de l'engin polyvalent.

5 Exigence énergétique (ID = "1.3") : dimensionnement de la batterie de l'engin e12

Dans le cahier des charges de l'engin de chantier e12, l'exigence d'autonomie ID = "1" (figure 1) impose une autonomie de 8 h sur le chantier.

Pour des raisons de durée de vie et d'encombrement, la batterie choisie pour équiper l'engin e12 utilise la technologie LiFePO_4 (Lithium Fer Phosphate). Pour des raisons de coût, un pack de 104 modules représentant une capacité de 146 kW·h est le maximum acceptable.

Objectif _____

Vérifier que la batterie choisie permet bien de garantir à l'engin e12 une autonomie d'au moins 8 h.



Figure 14 – intégration de la batterie

5.1 Estimation de la consommation de l'engin e12 sur un cycle standard

Pour prévoir la consommation de l'engin e12, un modèle multi-physique est proposé dans le document réponses DR 1. Il prend en compte la chaîne de puissance permettant le déplacement (translation) de l'engin e12 ainsi que celle permettant l'actionnement de son équipement (flèche, bec, bras, porte-outil et outil). Dans une volonté de clarté, concernant cette dernière chaîne de puissance, seul un couple *vérin + distributeur* est représenté.

La chaîne de puissance associée au déplacement de l'engin e12 est composée d'un variateur, d'un moteur synchrone, d'une boîte de vitesses, d'un arbre de transmission ainsi que d'essieux avant et arrière (composés tous les deux d'un différentiel, d'une transmission et de deux roues).

La chaîne de puissance de l'actionnement de l'équipement est composée d'un second variateur, d'un second moteur synchrone, d'une pompe hydraulique et de cinq couples *distributeur + vérins*. Par souci de simplification, seul un couple *distributeur + vérin* est pris en compte dans le modèle.

Q16 - Sur le document réponses DR 1 encadrer **en rouge** la chaîne de puissance liée au déplacement de l'engin e12 et **en bleu** celle liée à l'actionnement de l'équipement. Renseigner sur ce même document réponses, dans les cases rouges, les éléments suivants : distributeur, pompe, vérin, moteurs électrique.

Pour évaluer la quantité d'énergie consommée par l'engin e12 au cours d'un chantier, des cycles standards de fonctionnement ont été identifiés. Ici, celui correspondant à une ouverture de tranchée sera utilisé. Il se compose d'un déplacement pour se rendre sur place, de six opérations de creusement puis de deux déplacements (un aller et un retour) pour apporter des planches de soutènement.

Ce cycle de fonctionnement impose, à chaque instant, les positions, vitesses et accélérations des différents composants de l'engin e12. Ces grandeurs servent de valeurs d'entrée au modèle multi-physique établi précédemment.

La simulation permet de déterminer la puissance nécessaire pour réaliser le cycle de fonctionnement étudié au cours du temps, aussi bien pour le déplacement que pour l'actionnement de l'équipement. Le document réponses DR 2 donne ces deux puissances pour le cycle d'ouverture de tranchée étudié. Les documents réponses DR 3 et DR 4 donnent le détail de ces courbes sur une période plus courte. **Il est rappelé que seul un couple *distributeur + vérin* sur cinq est pris en compte dans la simulation.**

Q17 - Pour chacun des moteurs, surligner en rouge sur le document réponses DR 2 les zones correspondant à la puissance que doit fournir la batterie.

Q18 - Par lecture directe sur les courbes des DR 2, DR 3 et DR 4, déterminer une valeur approximative, en kW·h, de l'énergie nécessaire à la translation d'une part et à un vérin d'équipement d'autre part pour un cycle de 20 minutes. Pour rappel, l'énergie est l'intégrale de la puissance par rapport au temps et peut donc se déterminer à partir de l'aire sous la courbe de la puissance en fonction du temps.

Q19 - En considérant que le cycle d'ouverture d'une tranchée est répété 25 fois pendant une journée de 8 h et que l'équipement se compose de cinq vérins (en première approximation, on admettra que les cinq vérins ont le même comportement énergétique), déterminer l'énergie nécessaire au fonctionnement de la translation et de l'équipement pendant une journée.

Q20 - Le rendement global pour les deux chaînes étant évalué à 52 %, en déduire l'énergie totale que doit fournir la batterie. Quelles autres sources de consommation n'ont pas été prises en compte dans le modèle ? La batterie choisie seule permet-elle une autonomie de 8 h ?

5.2 Amélioration de l'autonomie grâce à la récupération d'énergies

Pour s'assurer que la batterie choisie suffise pour respecter le cahier des charges de l'engin e12, il est proposé de récupérer une partie de l'énergie consommée. Deux types d'énergie sont récupérables ici : l'énergie cinétique de l'engin e12 lorsqu'il est en mouvement et est freiné, ainsi que l'énergie potentielle de l'outillage lors de la descente de ce dernier.

5.2.1 Récupération d'énergie cinétique

La récupération de l'énergie cinétique de l'engin e12 se fait lors des phases de décélération de l'engin. Les essieux entraînent le moteur qui fait alors office de générateur et recharge la batterie.

Lors de la phase de décélération, des freins mécaniques sont utilisés. Pour limiter le temps de freinage, environ 55 % de l'énergie cinétique de l'engin e12 doit être dissipée par ces freins.

Q21 - Surligner **en vert**, sur le document réponses DR 2 les zones correspondant à l'énergie cinétique récupérable.

Q22 - À l'aide du document réponses DR 2 et DR 3 et des indications précédentes, déterminer l'énergie cinétique récupérable par la batterie sur l'ensemble d'une journée de 8 h.

5.2.2 Récupération d'énergie potentielle

La récupération de l'énergie potentielle de l'engin e12 se fait lors de la descente de l'équipement. Cette descente crée une pression et un débit dans les différents vérins de l'équipement. Cette énergie est en partie stockée dans des accumulateurs.

Le document réponses DR 5 représente le schéma hydraulique de l'alimentation du vérin de flèche avec son dispositif de récupération d'énergie dans trois cas de figure différents.

Q23 - Identifier sur le document réponses DR 5, parmi le (a), (b) ou (c), le schéma correspondant à la phase de récupération d'énergie, celui correspondant à l'utilisation de la pompe uniquement et celui correspondant à l'utilisation de l'énergie récupérée couplée avec celle de la pompe. La récupération d'énergie potentielle se fait-elle lorsque la tige du vérin sort ou rentre ?

Q24 - À quoi sert la valve de réglage notée u_1 ?

Q25 - À quoi sert la valve de réglage notée u_2 ? Expliquer ce que cela peut impliquer sur la quantité d'énergie totale récupérée ?

En asservissant le débit d'huile dans la valve u_1 , il est possible de récupérer jusqu'à 5 % de l'énergie fournie initialement pour faire monter l'équipement.

Q26 - Déterminer l'énergie potentielle récupérable sur une période de 8 h de cycle d'ouverture de tranchée.

5.3 Conclusion

Q27 - Le cahier des charges concernant l'autonomie de l'engin e12 est-il respecté pour le cycle étudié avec la batterie choisie et les systèmes de récupération d'énergie ?

6 Exigence de sécurité (ID = "1.1") : asservissement de l'angle d'assiette

Les six degrés de liberté de l'équipement de l'engin e12 lui procurent une grande marge de manœuvre dans des environnements encombrés. Celle-ci augmente cependant également la complexité du pilotage et donc le risque d'accidents. Pour limiter ce risque, un asservissement de la position angulaire du porte-outil (6) par rapport au sol (0) est mis en place. Cela permet de diminuer le nombre de commandes que doit gérer le pilote lors du déplacement d'une charge.

Pour garantir la sécurité du pilote et des autres personnes cet asservissement doit respecter les exigences suivantes :

- l'écart entre la consigne et la réponse du système doit être nul en régime permanent ;
- l'écart entre la consigne et la réponse du système doit être au maximum de $1,5^\circ$ à chaque instant.

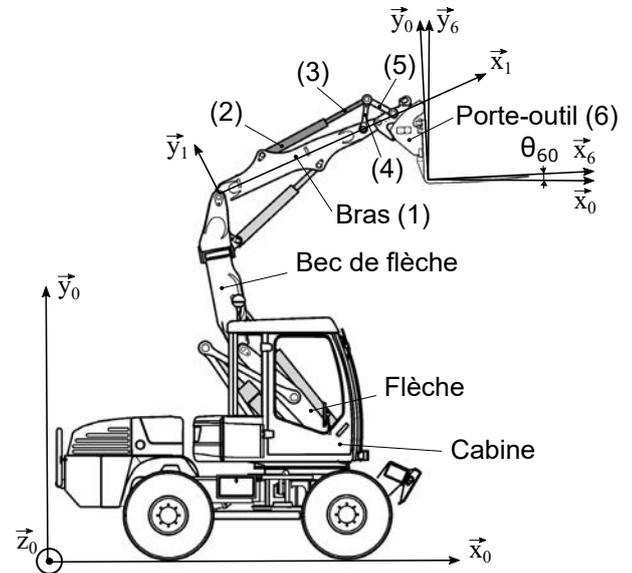


Figure 15 – structure de l'engin multifonction e12 de Mecalac

Objectif _____

L'objectif de cette partie est de proposer un modèle de la boucle d'asservissement permettant de prévoir les performances du système pour valider sa conception vis-à-vis des exigences ci-dessus.

6.1 Analyse structurelle

Objectif _____

Analyser la structure du bras polyarticulé et identifier la boucle d'asservissement de l'angle θ_{60} .

Le porte-outil (6) (figure 15) est piloté grâce à quatre vérins qui permettent respectivement d'entraîner en rotation la flèche par rapport à la cabine, le bec par rapport à la flèche, le bras par rapport au bec et enfin le porte-outil par rapport au bras (figure 15). L'asservissement de l'angle $\theta_{60} = (\vec{x}_0, \vec{x}_6)$ se fait via le contrôle du vérin (2 + 3) entre le bras et le porte-outil (figures 15 et 16).

Un système de mesure, étudié par la suite permet d'obtenir en temps réel l'angle θ_{60} . Cette mesure est comparée à l'angle souhaité (environ 10° si l'outil est un porte-palette). L'écart est traité par la carte de commande qui impose un courant de consigne à des électrovannes actionnant le distributeur du vérin (2+3). Le mouvement de la tige du vérin (3) entraîne un mouvement de rotation du porte-outil (6) grâce à un système d'embellage.

Q28 - Surligner sur le document réponse DR 6 les flux d'énergie **en bleu** et les flux d'information **en rouge**.

Q29 - À quoi est reconnaissable un système asservi ? Identifier la boucle d'asservissement de l'angle θ_{60} **en vert** sur le document réponse DR 6.

Le système d'équations obtenu à la question 31 est résolu pour trouver θ_{61} en fonction de x . Le résultat du calcul est tracé figure 19.

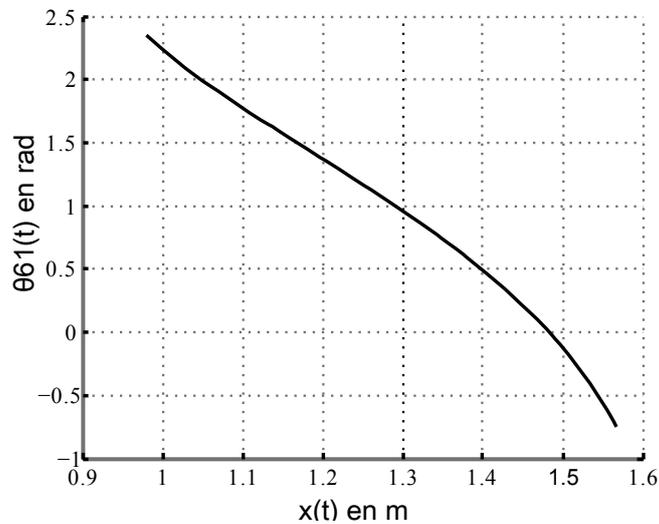


Figure 19 – résultat issu du système d'équations : θ_{61} (en rad) en fonction de x (en m)

Q32 - À partir de la figure 19, proposer un modèle linéaire (équation d'une droite) pour le système d'embellage. Quel est l'intérêt pour le conducteur d'avoir une transmission linéaire ?

6.3 Modélisation de la partie hydraulique

Objectif _____

Établir le modèle de comportement des composants hydrauliques (électrovannes, distributeur et vérin).

Le débit $q(t)$ en sortie du bloc (électrovannes + distributeur) a été mesuré pour trois valeurs distinctes du courant de consigne $i(t)$ (0,4 A, 1,5 A et 3 A). Les trois réponses indicielles (réponse à un échelon) sont données dans le document réponses DR 7).

Q33 - À partir de la réponse à l'échelon de 3 A, proposer un modèle comportemental du bloc électrovannes + distributeur en précisant la valeur de ses paramètres caractéristiques. On laissera sur le document les tracés ayant servi à les obtenir.

Q34 - Faire de même à partir de la réponse à l'échelon de 1,5 A. Comparer les deux modèles. Que peut-on conclure sur la linéarité du comportement de l'ensemble électrovannes + distributeur ?

Comme le montre la réponse indicelle pour une entrée en échelon de 0,4 A (DR 7), les électrovannes ne délivrent aucun débit pour un courant de commande inférieur à 0,5 A. Ce comportement est caractéristique de l'une des plus courantes non linéarités présentes dans les systèmes physiques (figure 20).

Q35 - D'après la remarque précédente, parmi les lois d'entrée-sortie proposées figure 20, laquelle correspond, en régime permanent, à celle de l'ensemble (électrovannes + distributeur) ?

Q36 - Le débit fourni par le distributeur étant, de plus, limité par le débit maximal de la pompe (110 m³/min), quel autre phénomène non linéaire de la figure 20 est à prendre en compte ? Tracer la courbe représentant le débit en fonction du courant en régime permanent du fait des deux phénomènes identifiés précédemment.

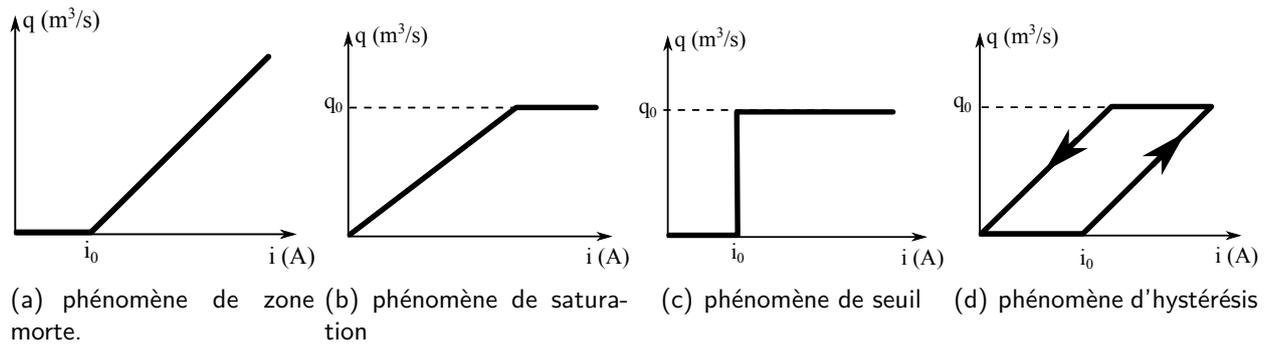


Figure 20 – principaux phénomènes non linéaires rencontrés dans les systèmes physiques

Q37 - Pour prendre en compte les deux phénomènes non linéaires identifiés, compléter l'algorithme donné dans le document réponses DR 8. Cet algorithme permet de prévoir la valeur du débit (noté q) imposé par le distributeur. Pour cela, on notera i_c la valeur du courant de consigne envoyé aux électrovannes, q_0 le débit maximal fourni par la pompe, i_0 la valeur limite avant laquelle aucun débit ne sort du distributeur et K le gain de l'ensemble (électrovannes + distributeur) lorsqu'il a un comportement linéaire.

Pour modéliser le vérin, le fluide circulant dans le circuit hydraulique est considéré comme incompressible.

Q38 - À l'aide de cette hypothèse, donner l'expression du gain k_v modélisant le vérin avec $v(t) = k_v q(t)$ en fonction de S la section du piston. $v(t) = \frac{dx(t)}{dt}$ est la vitesse de sortie de la tige du vérin.

Grâce aux modèles établis, il est donc possible de prévoir la valeur de la vitesse $v(t)$ (et de la position $x(t)$) de la tige du vérin en fonction du courant de consigne donné aux électrovannes.

6.4 Analyse et modélisation du système de mesure

Objectif _____

Établir le modèle de comportement du système de mesure de l'angle θ_{60} .

Pour mesurer l'angle $\theta_{60}(t)$, une centrale inertielle contenant un gyroscope trois axes et un accéléromètre trois axes (figure 21) est installée au point E du porte-outil (figure 16).

Q39 - Citer deux autres types de capteur qui sont couramment employés pour mesurer des angles. Justifier la préférence ici d'une centrale inertielle par rapport à ces autres solutions.

Le capteur gyroscopique permet de mesurer la vitesse angulaire du porte-outil par rapport au sol. Seule la vitesse angulaire suivant \vec{z}_0 (figure 15) sera étudiée ici. Elle sera notée $\omega_{z60}(t)$.

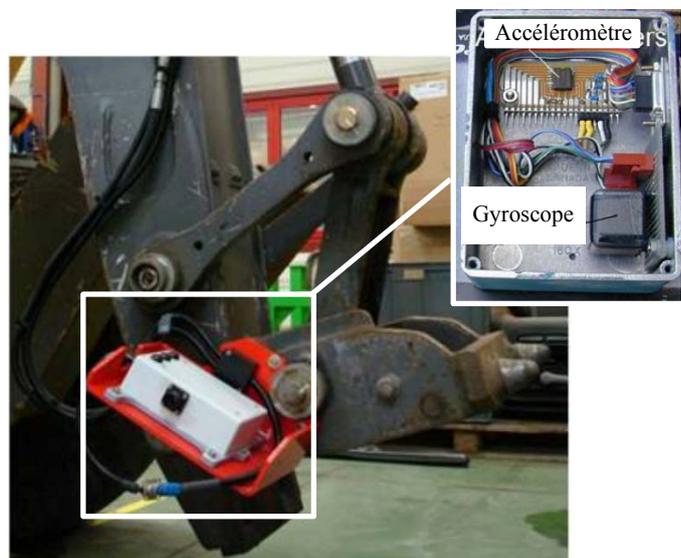


Figure 21 – montage du capteur sur le porte-outil

La sortie du gyroscope est numérique, c'est-à-dire que la mesure de $\omega_{z60}(t)$ se fait uniquement à des instants t_i discrets. Les valeurs $\theta_{60}(t_i)$ sont approximées en intégrant numériquement les valeurs $\omega_{z60}(t_i)$.

Pour pallier les problèmes d'intégration numérique il faut mesurer régulièrement une valeur absolue de l'angle θ_{60} . L'utilisation de l'accéléromètre trois axes permet de le faire mais il doit être étalonné.

L'accéléromètre fournit, pour chaque axe, une tension analogique image de l'accélération, un CAN (Convertisseur Analogique-Numérique) convertit cette tension en un entier qui est ensuite traité par la carte de commande.

Étalonner l'accéléromètre consiste à déterminer, pour chaque axe, les constantes G (gain) et φ (offset) telles que :

$$acc_reelle = G \times (acc_mesuree + \varphi) \quad (1)$$

Où $acc_mesuree$ est la valeur de l'accélération transmise à la carte de commande par l'accéléromètre et acc_reelle est sa valeur réelle.

Le protocole d'étalonnage est le même pour chaque axe : l'axe de l'accéléromètre à étalonner est placé verticalement dans le champ gravitationnel, dans un sens puis dans l'autre. Il mesure ainsi g puis $-g$ (figure 22).

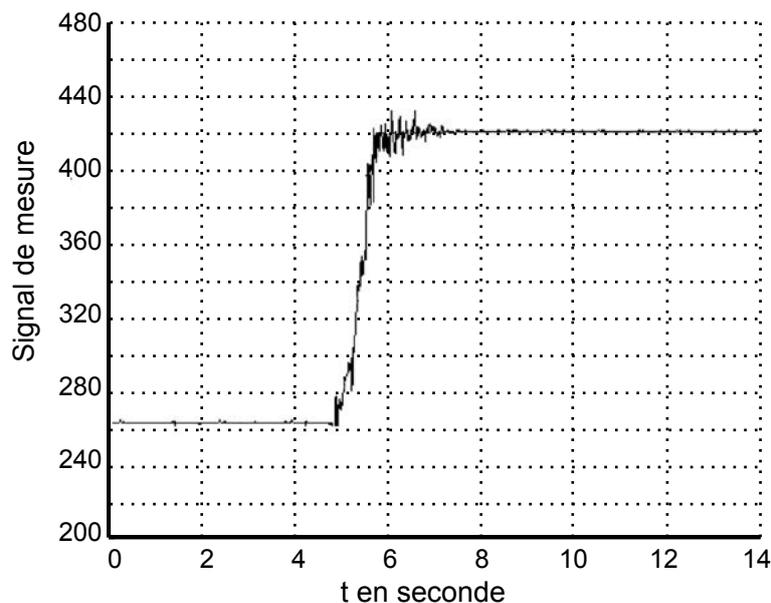


Figure 22 – Valeurs reçues par la carte de commande lors de la phase d'étalonnage de l'axe x de l'accéléromètre

Q40 - À partir de la figure 22, déterminer le gain G et l'offset φ correspondant à l'axe x de l'accéléromètre.

6.5 Modèle global : résultats et conclusions

Objectif _____

Analyser les résultats de simulation obtenus à partir du modèle établi précédemment et conclure vis-à-vis du cahier des charges.

On se place dans le contexte du déplacement d'une palette (figure 23). La palette doit être déplacée d'un point A à un point B (positions (a) et (b)) en restant stable. Pour cela, la consigne de l'angle θ_{60} est constante et fixée à 10° tout au long du déplacement de l'engin e12 qui démarre à 10 s et s'arrête à 60 s (figures 24 et 25).



Figure 23 – position de l'engin e12 lors du déplacement d'une palette d'un point A (position (a)) à un point B (position (b))

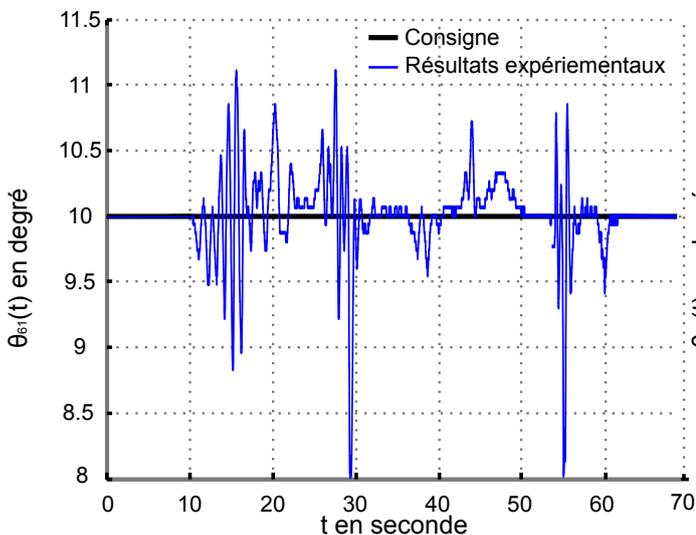


Figure 24 – résultats expérimentaux, mesurés sur la machine lors de d'un essai

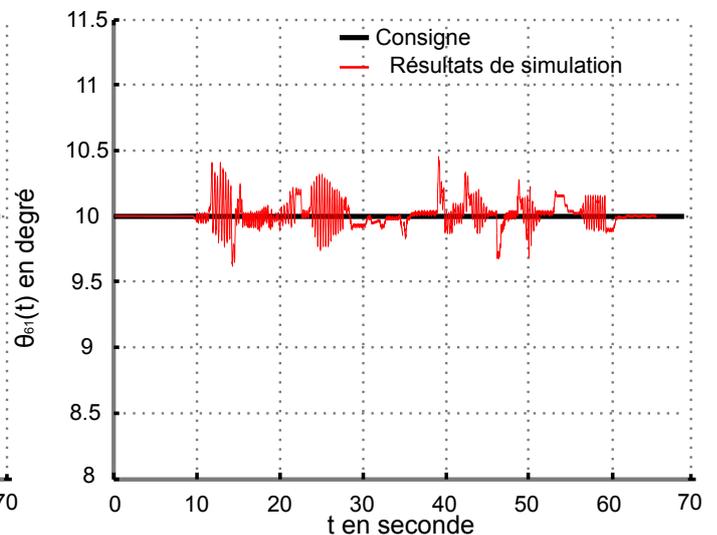


Figure 25 – résultats de simulation, obtenus grâce au modèle mis en place précédemment

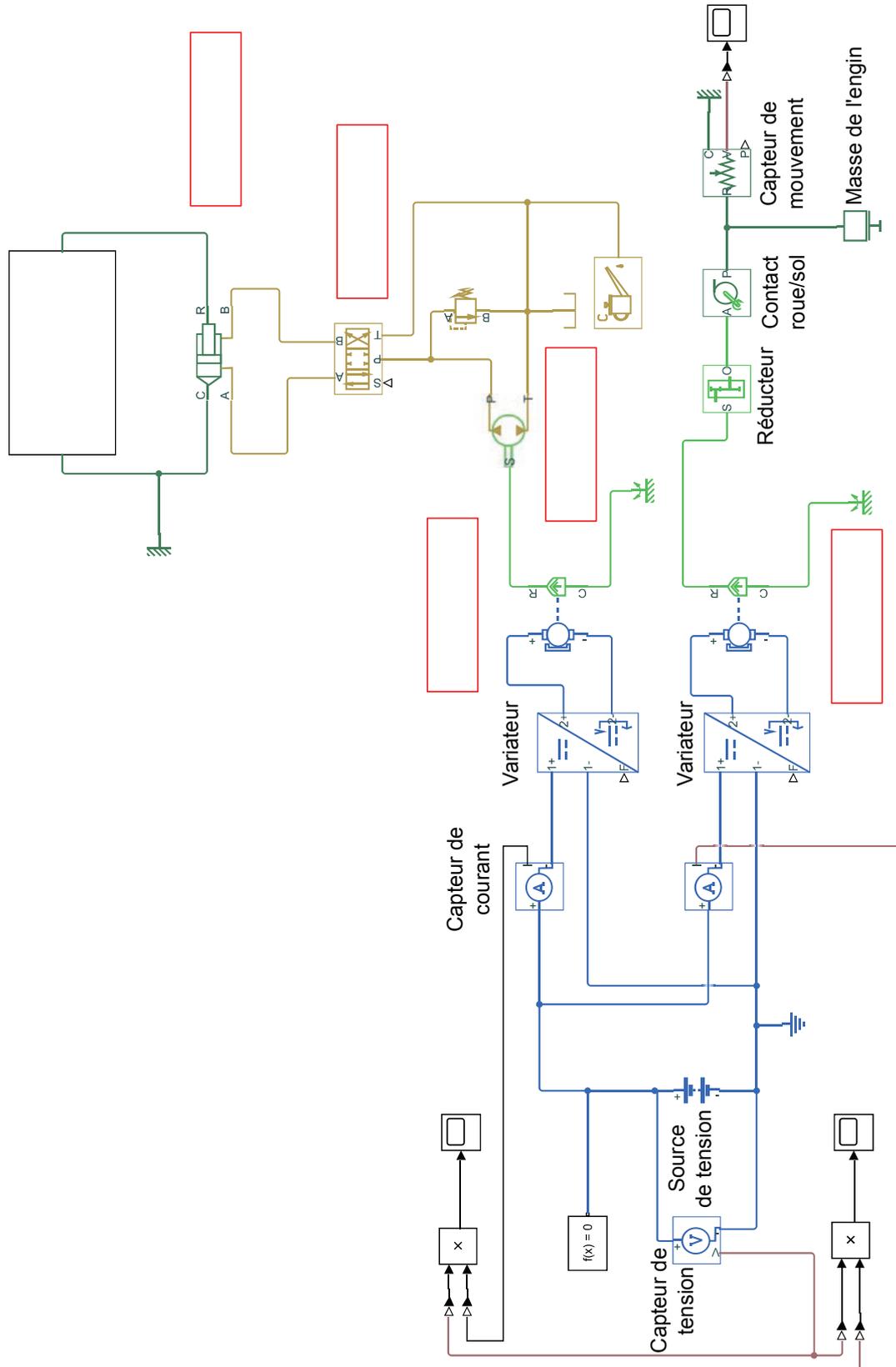
Q41 - Analyser les performances simulées et les performances mesurées du système par rapport au cahier des charges. Expliciter les hypothèses prises qui expliquent les écarts entre les performances simulées et les performances mesurées.

7 Conclusion générale

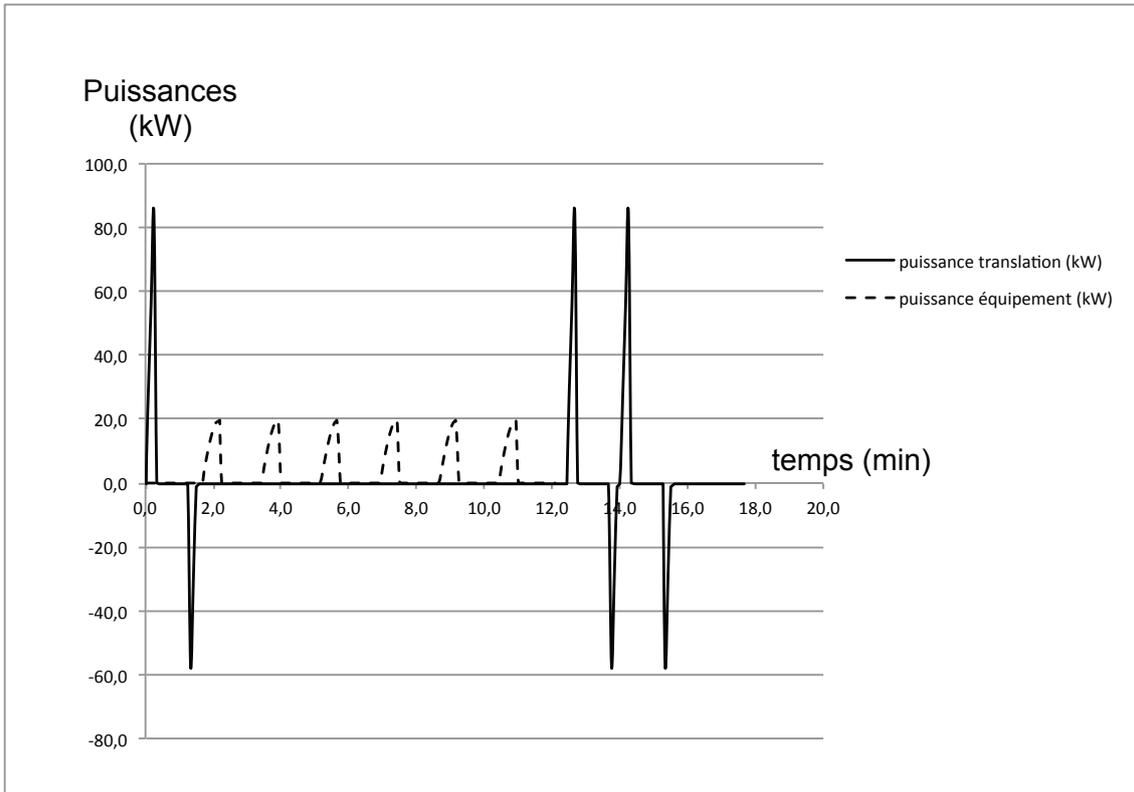
Q42 - Rappeler les enjeux liés à la conception d'un engin de chantier multi-fonction innovant. Conclure sur l'intérêt de l'engin e12 vis à vis de ces enjeux.

NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

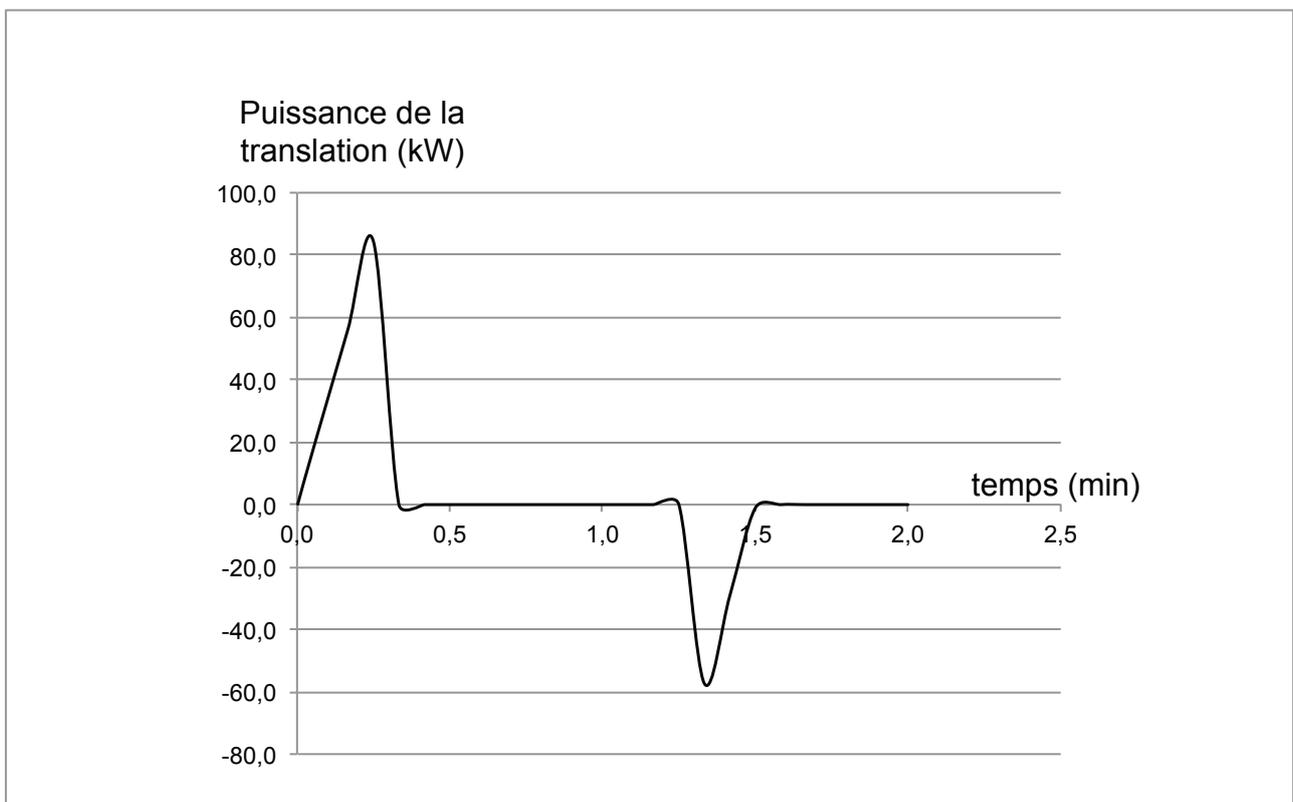
Document réponses



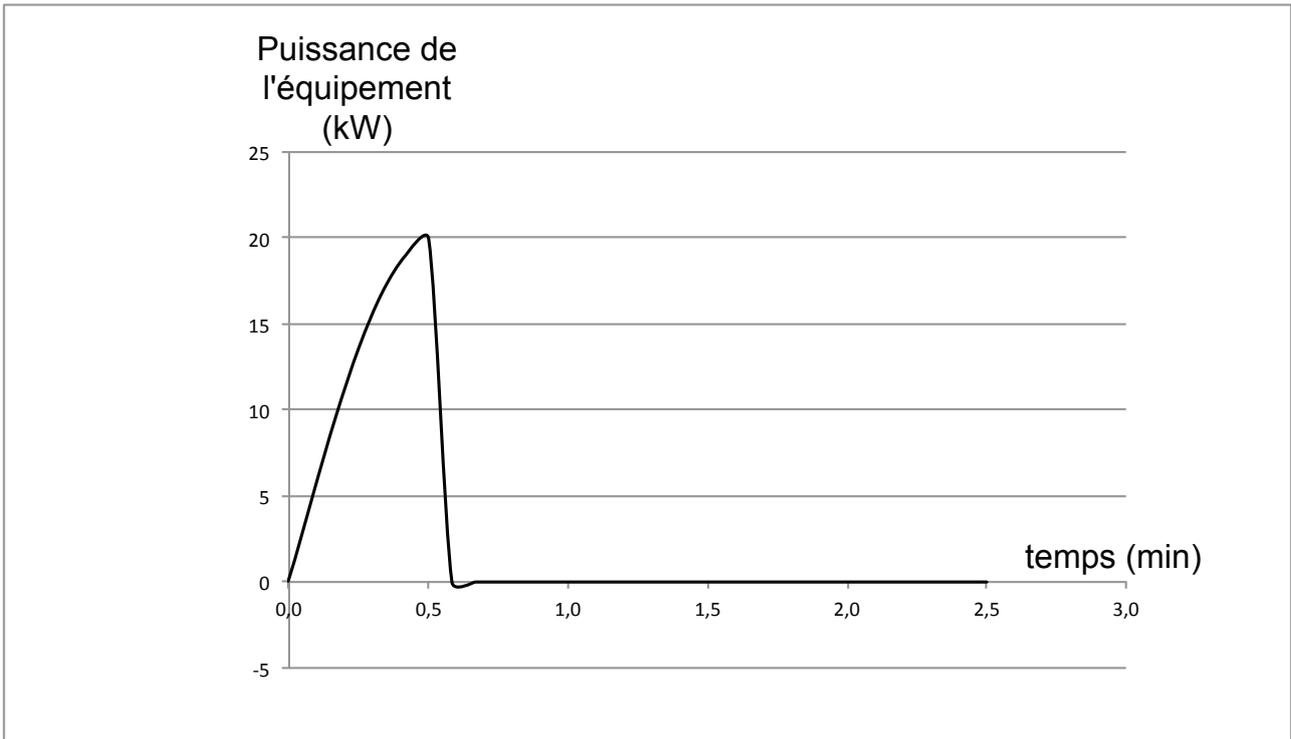
DR 1 – modèle multiphysique partiel de l'engin e12



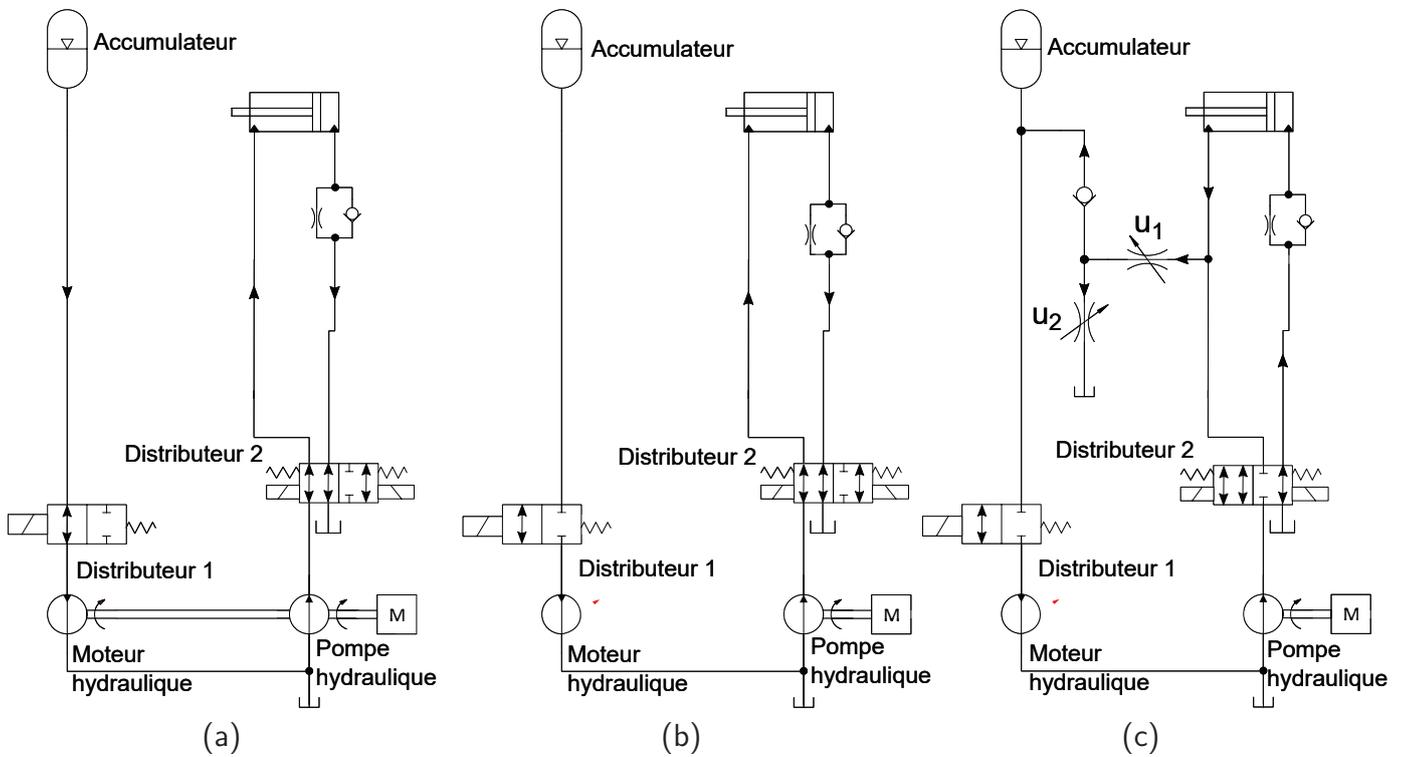
DR 2 – puissances fournis à la translation et aux équipement sur un cycle de fonctionnement standard



DR 3 – puissance fournie à la translation, zoom sur un déplacement

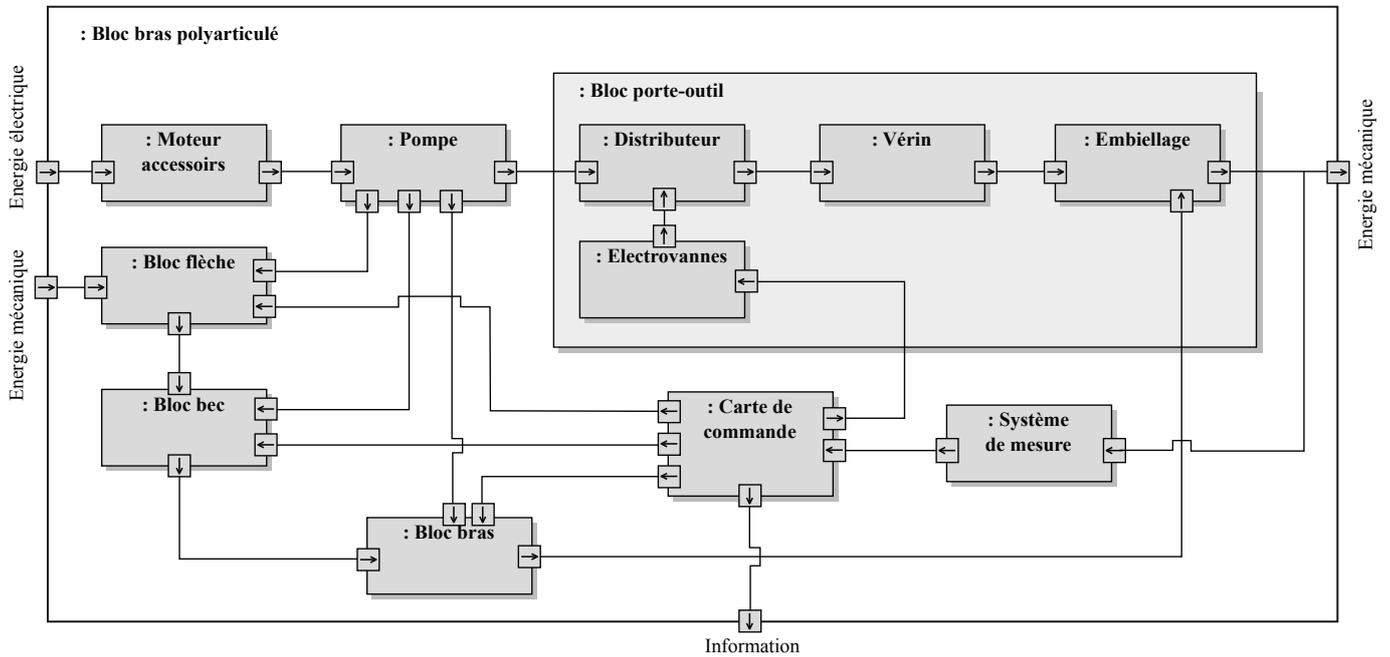


DR 4 – puissance fournie à l'équipement, zoom sur un creusement

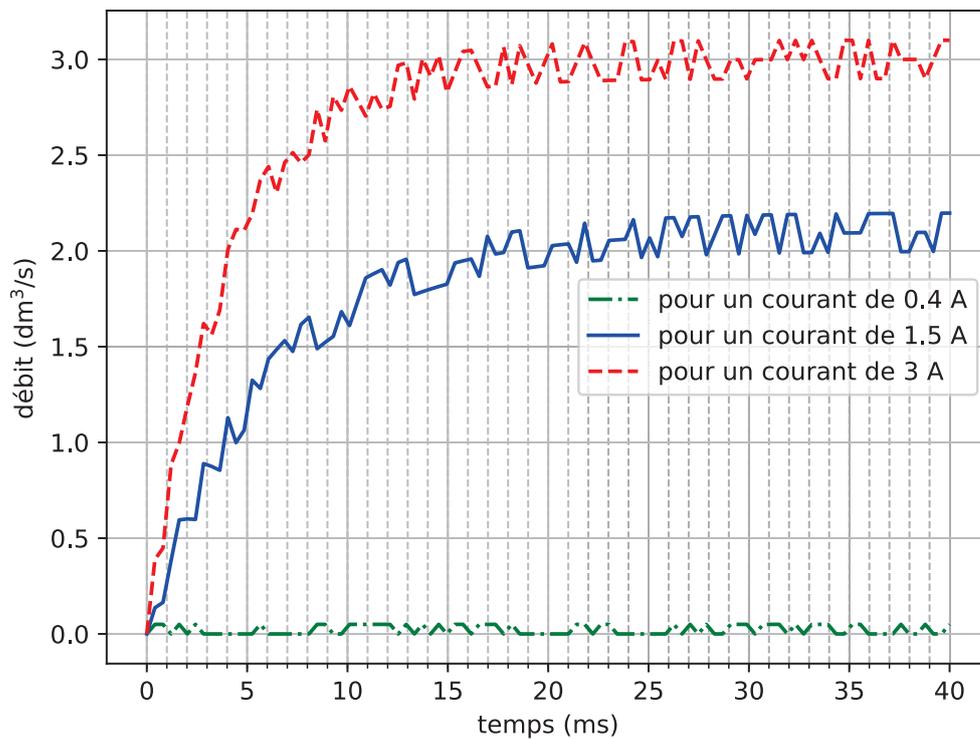


DR 5 – schéma hydraulique du vérin de flèche avec récupération d'énergie

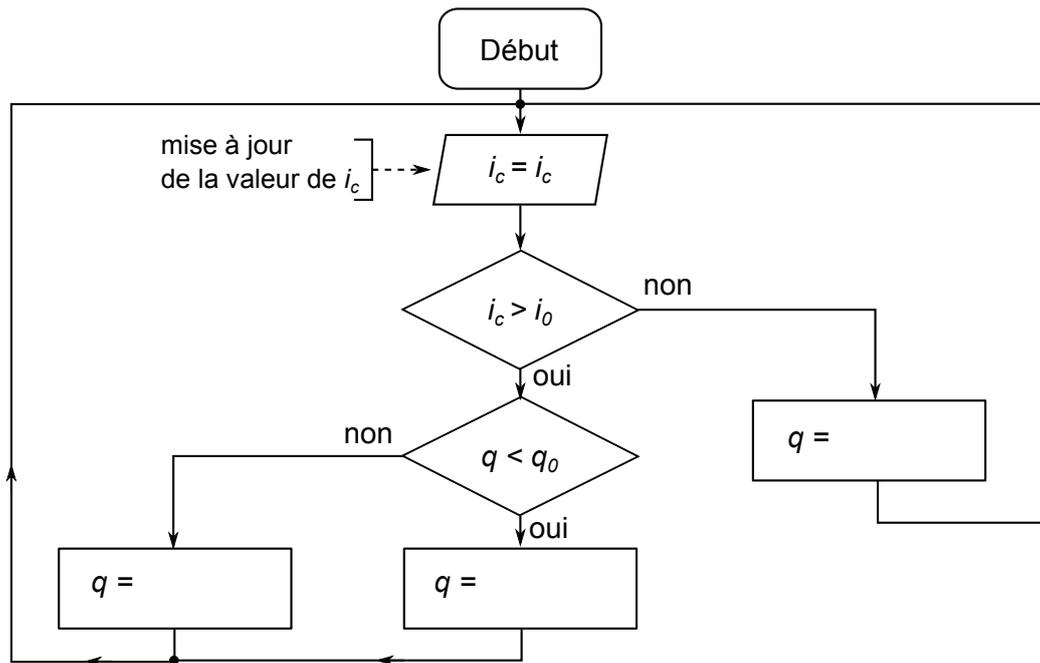
NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE



DR 6 – description des flux circulant dans le bras polyarticulé



DR 7 – réponses indicielles du bloc électrovanne+distributeur



DR 8 – algorithme permettant de prévoir la valeur du débit q

