



Science Arts & Métiers (SAM)

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers Institute of Technology researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <https://sam.ensam.eu>
Handle ID: <http://hdl.handle.net/10985/9238>

To cite this version :

Gabriel ABBA - Comparaison des actionneurs - 2012

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

Administrator : scienceouverte@ensam.eu



Livrable sur la tâche T4.3 Comparaison des actionneurs

G. Abba

LCFC, EA 4495, Arts et Métiers ParisTech de Metz, 4 rue Augustin Fresnel, 57078
METZ Cedex.

Email : gabriel.abba@ensam.eu

Partie 1 : Résultats de la sélection des moteurs électriques du robot HYDROID

1 Introduction

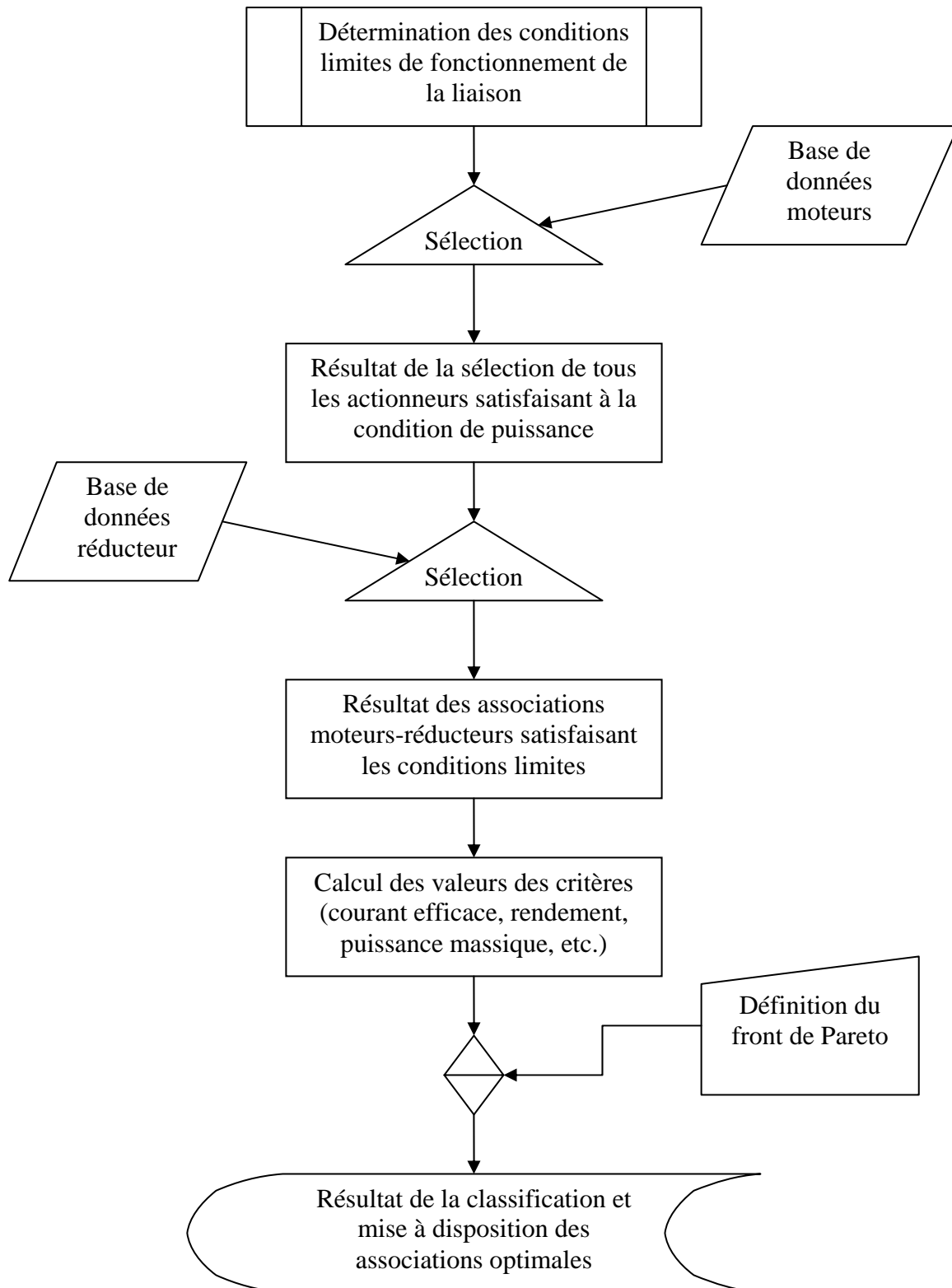
Afin d'acquérir son autonomie de mouvement, un robot bipède ou humanoïde doit être équipé d'actionneurs et d'une réserve d'énergie, très souvent sous forme de batteries ou de réservoir de fluides sous pression. La masse et le volume dévolus à ces fonctions étant très limités, il est absolument nécessaire d'économiser l'énergie disponible et si possible de restituer l'énergie cinétique emmagasinée lors de chaque phase de freinage. D'autre part, pour une masse totale du robot en mouvement, si l'on diminue la masse réservée au squelette (masse des corps constituant le support de la cinématique du robot) et aux actionneurs, alors la masse restante pour la fonction de stockage d'énergie, les fonctions de décision et les capteurs est d'autant plus élevée.

Les objectifs de ce rapport sont donc multiples. En premier, le rapport établit la méthodologie de sélection des actionneurs d'un robot en fonction d'un ou plusieurs critères à satisfaire tout en respectant les contraintes nécessaires au bon fonctionnement du robot, contraintes elles mêmes liées très fortement aux performances dynamiques exigées du robot et aux différentes tâches auxquelles le robot est destiné. Il est facile de montrer que la sélection des actionneurs est fortement liée aux choix technologiques des dispositifs de transmission des mouvements et de la technologie même des dits actionneurs. Le second objectif du rapport est par conséquent d'élaborer une méthode de sélection couplée des actionneurs et des transmissions. Pour se faire, nous limitons délibérément les choix à certaines technologies. Enfin, le dernier objectif du rapport est de proposer un modèle physique approché mais néanmoins le plus précis possible du comportement énergétique de l'ensemble de la chaîne de transmission des mouvements et donc un modèle énergétique des actionneurs, des transmissions cinématiques jusqu'aux variables articulaires du robot.

2 Méthodologie utilisée pour le choix des moteurs

La méthodologie est basée sur une optimisation d'un ou plusieurs critères (rendement, puissance massique, endurance moyenne, courant efficace, etc.) tout en satisfaisant les contraintes physiques limites liées à la technologie de l'actionneur. De plus, on associe une ou plusieurs structures cinématiques de transmission à chaque actionneur lorsque les contraintes ne sont pas vérifiées ou que l'un des critères peut ainsi être optimisé.

La méthodologie est basée sur l'organigramme ci-dessous :



Le résultat de l'ensemble du processus de sélection des actionneurs et des transmissions cinématiques fourni au concepteur les éléments nécessaires au choix argumenté de la solution retenue. Selon les conditions d'endurance souhaitées du robot et de son efficacité énergétique, le résultat ne sera pas systématiquement le même.

3 Choix des actionneurs pour des conditions de fonctionnement extrêmes

On considère dans un premier temps le fonctionnement du robot avec des valeurs limites supportées par les transmissions hydrauliques associées à chaque articulation des jambes du robot Hydroïd. On fait l'hypothèse que ces valeurs limites de couple et de vitesse doivent toujours être disponibles et que le cycle de fonctionnement de l'actionneur est de type C1. Dans ce cas, nous savons déjà que le courant thermique équivalent (courant efficace) est égal au courant nécessaire pour produire le point de fonctionnement limite. Le réducteur associé au moteur est uniquement donné à titre indicatif et permet de connaître le rapport de réduction équivalent que le réducteur hydraulique devrait permettre dans des conditions limites de fonctionnement. Le choix n'est pas tout à fait rigoureux car les critères d'appréciation des associations moteur-réducteur sont basés sur le rendement du réducteur. Ce point peut être affiné par la suite de l'étude.

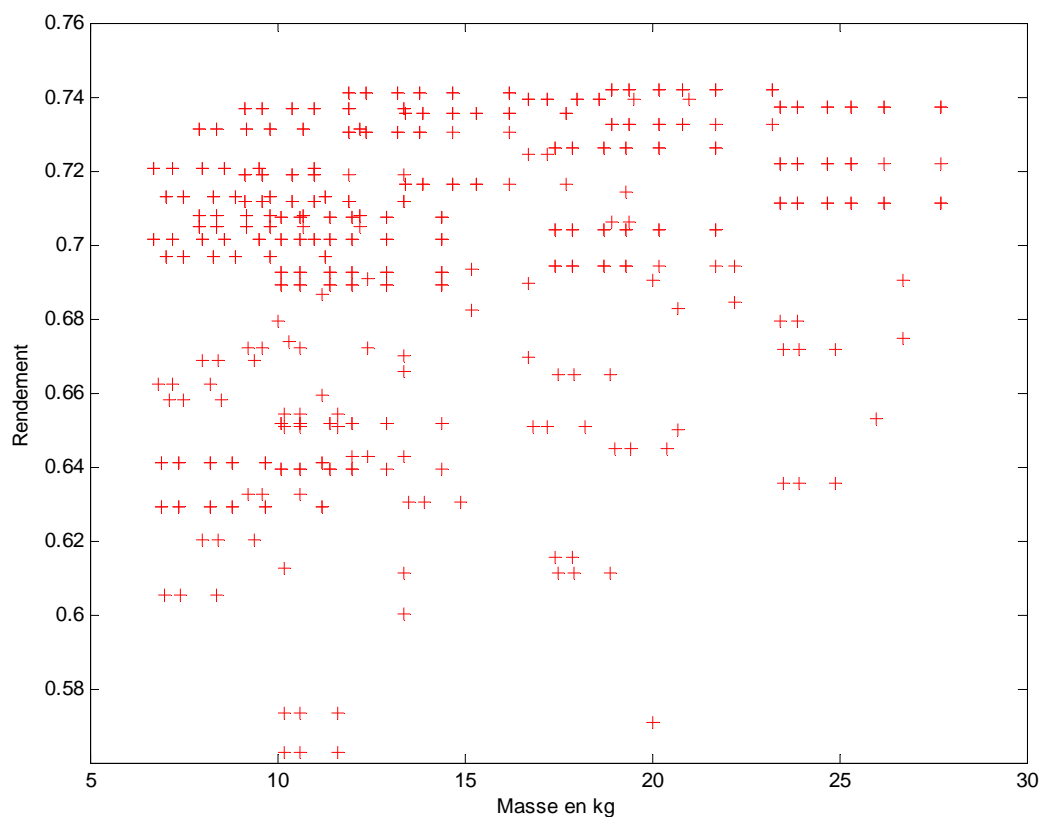
Etude de l'articulation des hanches

$C_{\max} = 150 \text{ Nm}$

$\Omega_{\max} = 2,7 \text{ rad/s}$

$P_{\max} = 405 \text{ W}$

Le programme recherche la meilleure solution de choix du moteur et du réducteur de l'articulation des hanches. Dans la première étape de la sélection, le programme développé va fournir l'ensemble des associations possibles. Toutes ces solutions (elles sont au nombre de 442) sont d'abord exploitées dans le plan (masse-rendement) comme le montre la figure ci-dessous.



On peut remarquer sur le graphique précédent que selon le rendement exigé, on sera obligé de choisir un ensemble moteur-réducteur plus ou moins lourd. Il existe donc un front de Pareto qu'il faut préciser. Si l'on désire un ensemble léger, on cherche dans la zone de masse

inférieure à 7 kg puisqu'il existe 9 solutions. On peut par exemple établir la liste de tous les ensembles qui conviennent dans le début du graphique. Le programme nous donne les résultats suivants :

N°	Nom moteur	Réducteur	Masse	Rapport	Rendement	Alpha
1	RS520G	HFUC252AGR	M= 6.720	N=80	R=0.7207	A=0.7022
2	RS520G	HFUC252AGR	M= 6.720	N=100	R=0.7015	A=0.5618
3	RS520G	CSG252AGR	M= 6.720	N=80	R=0.7207	A=0.7022
4	RS520G	CSG252AGR	M= 6.720	N=100	R=0.7015	A=0.5618
5	RS520G	CSD322AGR	M= 6.810	N=100	R=0.6625	A=0.5618
6	MC17H	HFUC252AGR	M= 6.920	N=80	R=0.6292	A=0.9868
7	MC17H	HFUC252AGR	M= 6.920	N=100	R=0.6409	A=0.7895
8	MC17H	CSG252AGR	M= 6.920	N=80	R=0.6292	A=0.9868
9	MC17H	CSG252AGR	M= 6.920	N=100	R=0.6409	A=0.7895

On peut remarquer que les configurations 5 à 9 ont les rendements les plus faibles pour les masses les plus importantes, elles sont donc à éviter.

Les configurations 1 et 3 ont la masse la plus faible, le meilleur rendement et ne diffèrent que sur le type de montage et de boîtier du réducteur, il faut donc retenir l'une de ces deux configurations.

Le coefficient alpha de la configuration 1 étant inférieur à 1, cela nous garantit une durée de vie importante avec un fonctionnement permanent possible à vitesse maximale.

On peut retenir qu'il nous faut donc compter avec une masse d'environ 6,3 kg pour l'actionneur des hanches.

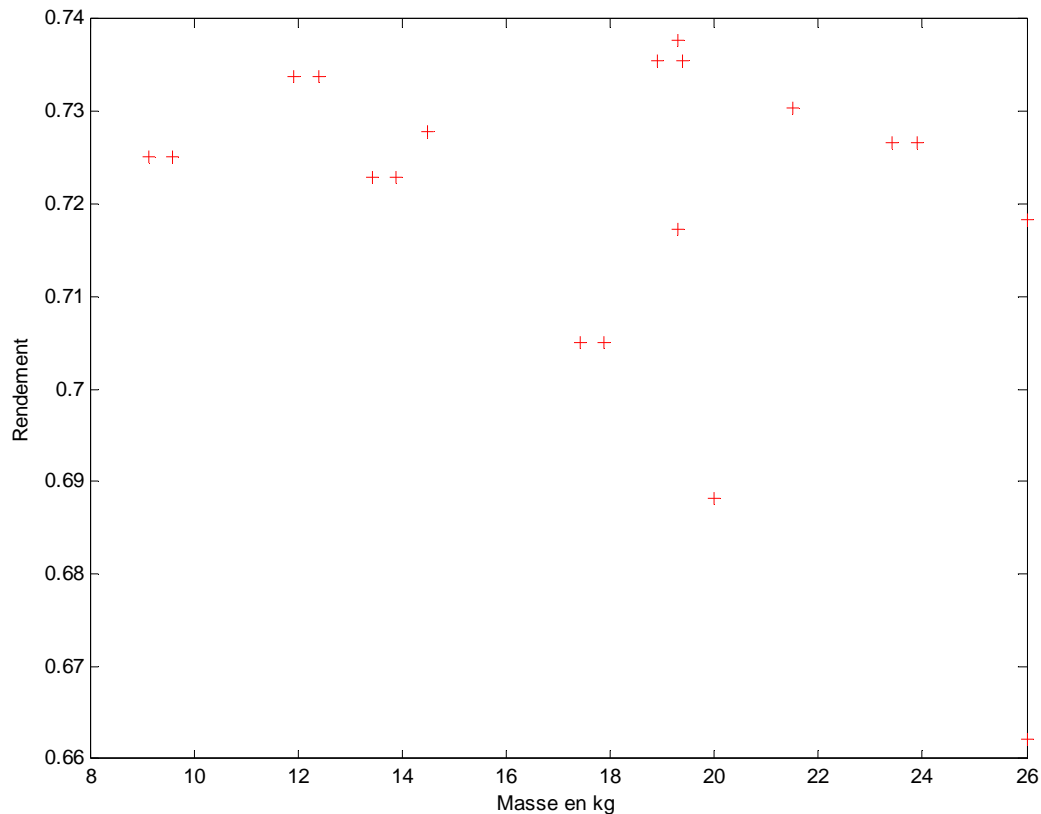
Etude de l'articulation des genoux

$$C_{\max} = 108 \text{ Nm}$$

$$\Omega_{\max} = 7 \text{ rad/s}$$

$$P_{\max} = 756 \text{ W}$$

Le programme recherche la meilleure solution de choix du moteur et du réducteur de l'articulation des genoux. Dans la première étape de la sélection, le programme développé va fournir l'ensemble des associations possibles. Toutes ces solutions (elles sont au nombre de 19) sont d'abord exploitées dans le plan (masse-rendement) comme le montre la figure ci-dessous.



Si l'on désire un ensemble léger, on cherche dans la zone de masse inférieure à 10 kg puisqu'il existe 2 solutions. On peut par exemple établir la liste de tous les ensembles qui conviennent dans le début du graphique. Le programme nous donne les résultats suivants :

N°	Nom moteur	Réducteur	Masse	Rapport	Rendement	Alpha
1	RS540C	HFUC252AGR	M= 9.120	N=30	R=0.7252	A=0.9474
2	RS540C	HFUC322AGR	M= 9.590	N=30	R=0.7252	A=0.9474

On peut remarquer que les deux configurations sont presque identiques. La configuration 1 fournit la masse la plus faible.

On peut retenir qu'il nous faut donc compter avec une masse d'environ 8,7 kg pour l'actionneur des genoux.

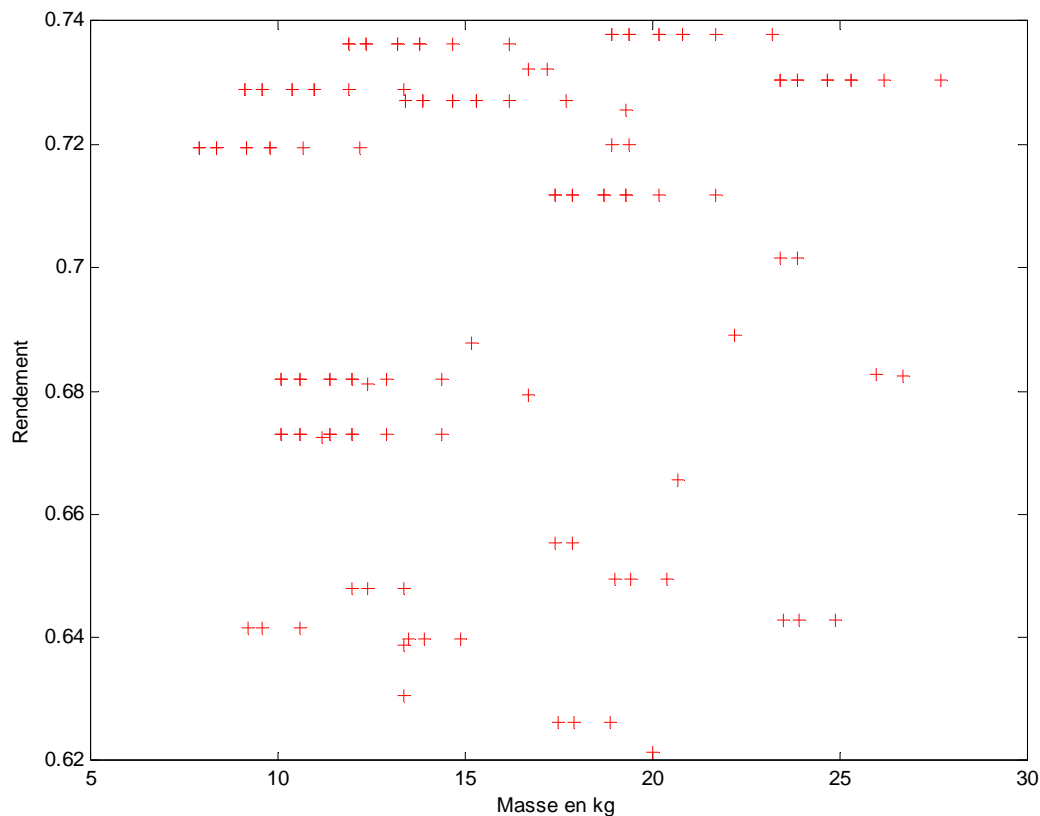
Etude de l'articulation des chevilles

$C_{max} = 157 \text{ Nm}$

$\Omega_{max} = 4,3 \text{ rad/s}$

$P_{max} = 675,1 \text{ W}$

Le programme recherche la meilleure solution de choix du moteur et du réducteur de l'articulation des chevilles. Dans la première étape de la sélection, le programme développé va fournir l'ensemble des associations possibles. Toutes ces solutions (elles sont au nombre de 128) sont d'abord exploitées dans le plan (masse-rendement) comme le montre la figure ci-dessous.



Si l'on désire un ensemble léger, on cherche dans la zone de masse inférieure à 9 kg puisqu'il existe 4 solutions. On peut par exemple établir la liste de tous les ensembles qui conviennent dans le début du graphique. Le programme nous donne les résultats suivants :

N°	Nom moteur	Réducteur	Masse	Rapport	Rendement	Alpha
1	RS530E	HFUC252AGR	M= 7.920	N=50	R=0.7195	A=0.9812
2	RS530E	HFUC322AGR	M= 8.390	N=50	R=0.7195	A=0.9812
3	RS530E	CSG252AGR	M= 7.920	N=50	R=0.7195	A=0.9812
4	RS530E	CSG322AGR	M= 8.390	N=50	R=0.7195	A=0.9812

On peut remarquer que les quatre configurations sont presque identiques. La configuration 1 fournit la masse la plus faible.

On peut retenir qu'il nous faut donc compter avec une masse d'environ 7,5 kg pour l'actionneur des genoux.

En conclusion, on peut dire que les solutions trouvées conduisent à des moteurs très imposants car le fonctionnement de service S1 choisi comme hypothèse pour le dimensionnement représente une solution extrême. Ces choix sont uniquement basés sur les conditions limites de fonctionnement prévues par le cahier des charges.

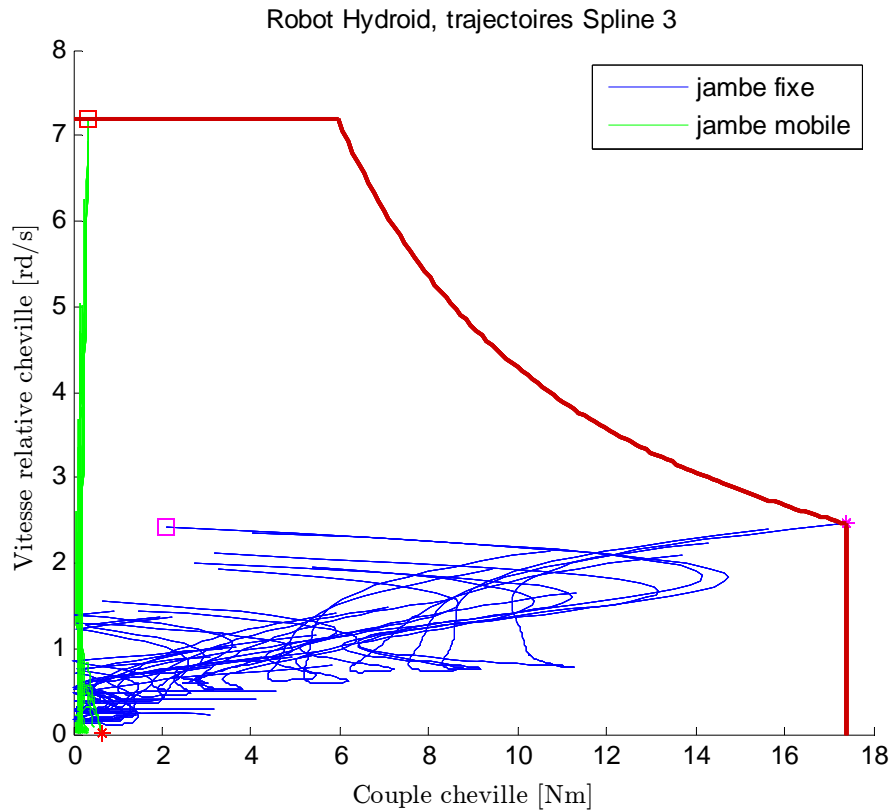
Dans le cas où l'on dispose d'une réserve d'énergie utilisable en même temps que l'énergie fournie par le moteur, on peut dimensionner le moteur pour une puissance moyenne à fournir par pas et fixer la vitesse de rotation de l'actionneur pour un rendement optimal du réducteur hydraulique.

4 Diagrammes de fonctionnement des moteurs

Les trajectoires sont issues des optimisations effectuées avec un critère sthénique. Les fonctions supports des trajectoires sont des fonctions Spline cubique. La vitesse moyenne

d'avance varie entre 0,2 m/s et 1 m/s. La marche est une succession de phase de simple support.

Les figures suivantes montrent le plan (Couple-Vitesse) pour les moteurs placés aux articulations des chevilles, des genoux et des hanches. Comme le même moteur est utilisé alternativement pour actionner la jambe fixe puis la jambe mobile, les trajectoires des deux jambes ont été regroupées dans le même graphique.



Le tracé pour l'articulation des chevilles montrent que le mouvement de la cheville de la jambe fixe impose le couple maximum et la puissance maximale alors que le mouvement de la cheville de la jambe mobile impose la vitesse maximale du moteur.

Les valeurs maximales obtenues avec les trajectoires Spline sélectionnées sont :

$$C_{\max} = 17,4 \text{ Nm}$$

$$\Omega_{\max} = 7,2 \text{ rad/s}$$

$$P_{\max} = 42,8 \text{ W}$$

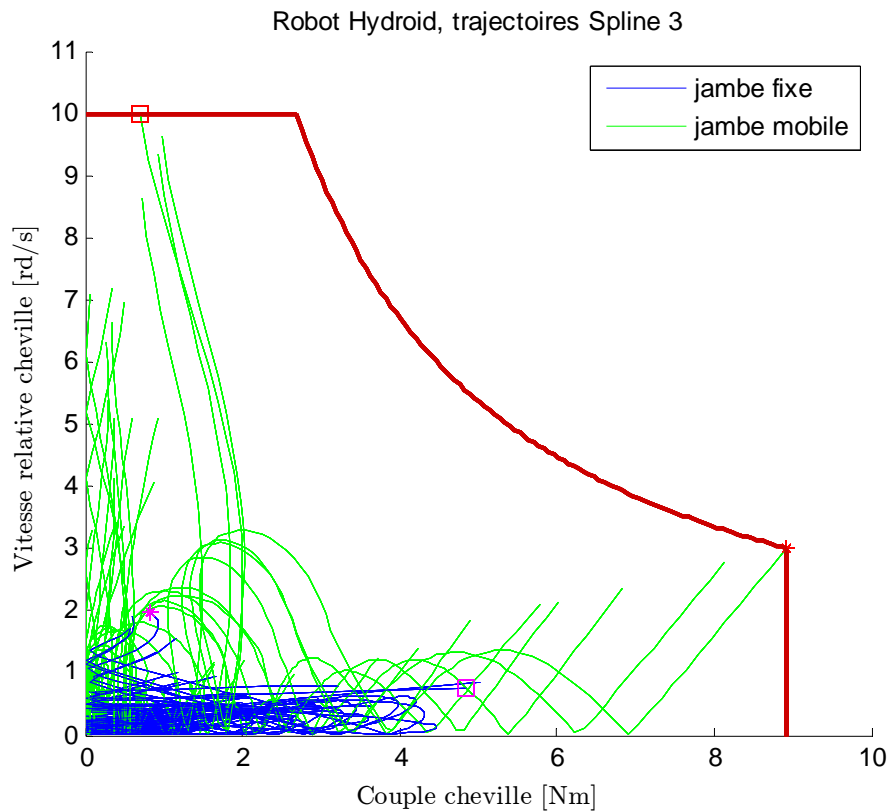
Le tracé pour l'articulation des genoux montrent que le mouvement du genou de la jambe mobile impose le couple maximum, la puissance maximale et la vitesse maximale du moteur. Cette articulation nécessite la puissance la plus faible.

Les valeurs maximales obtenues avec les trajectoires Spline sélectionnées sont :

$$C_{\max} = 8,9 \text{ Nm}$$

$$\Omega_{\max} = 10,0 \text{ rad/s}$$

$$P_{\max} = 26,9 \text{ W}$$



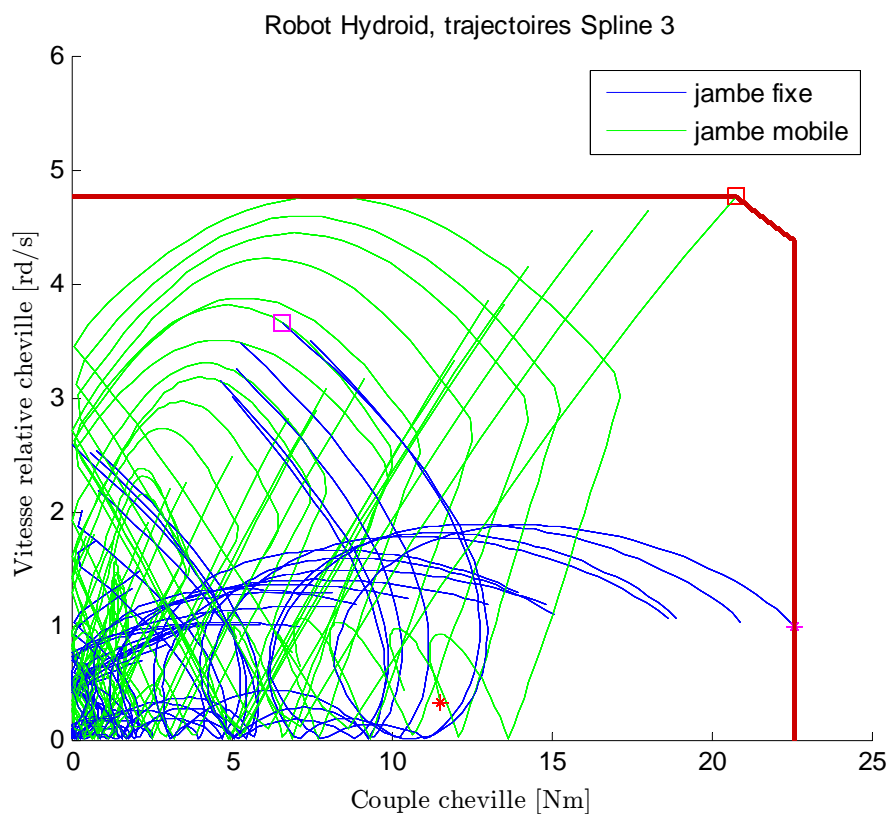
Le tracé pour l'articulation des hanches montrent que le mouvement de la hanche de la jambe fixe impose le couple maximum alors que le mouvement de la cheville de la jambe mobile impose la vitesse maximale et la puissance maximale du moteur.

Les valeurs maximales obtenues avec les trajectoires Spline sélectionnées sont :

$$C_{\max} = 22,6 \text{ Nm}$$

$$\Omega_{\max} = 4,8 \text{ rad/s}$$

$$P_{\max} = 99,0 \text{ W}$$

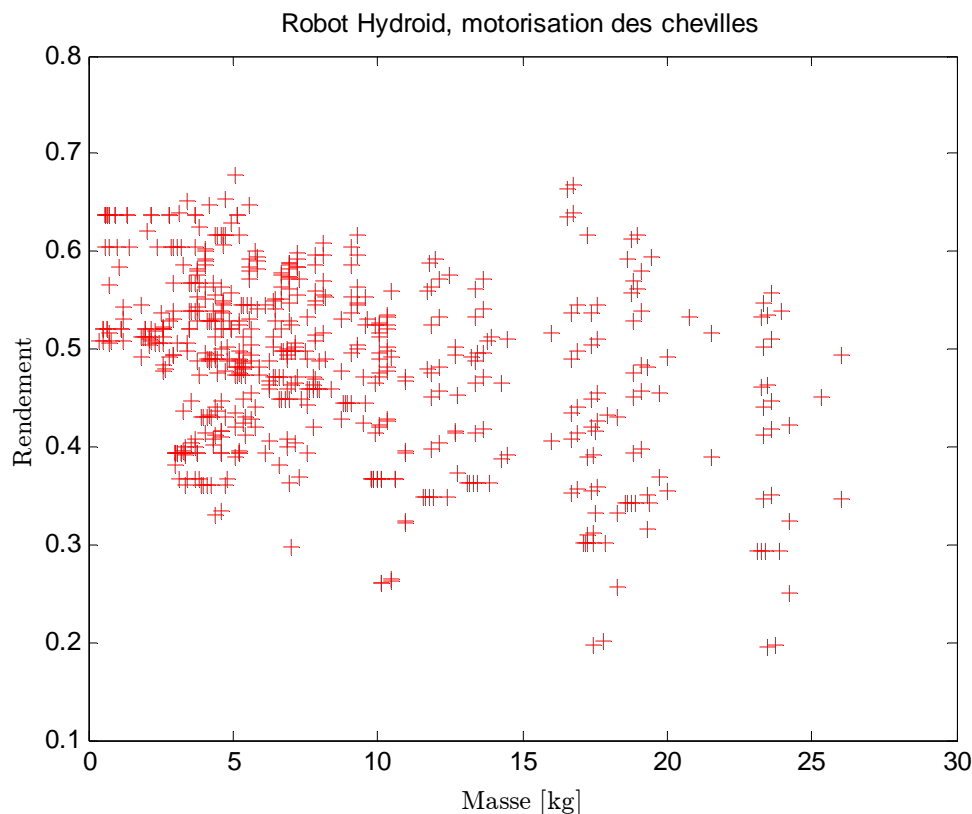


5 Choix des moteurs

Le choix d'un moteur s'effectue par étape successive pour satisfaire les contraintes maximales, les contraintes moyennes (essentiellement thermiques) et le choix optimal du réducteur associé. Dans le paragraphe ci-dessous, on suppose que chaque articulation est une liaison pivot actionnée par un moto-réducteur électrique. Le type de moteur (CC, MS) et sa technologie (aimant, forme, etc.) ne sont pas imposés. De même la technologie des réducteurs n'est pas imposée, mais il faut cependant que le moteur puisse être monté sur le réducteur. Il faut donc que la taille et les diamètres des axes d'entrée et de sortie soient compatibles.

La sélection s'effectue parmi l'ensemble des couples moteur-réducteur disponible au laboratoire. Seuls les moteurs et les réducteurs de cette base de donnée pourront être choisis, mais rien n'interdit par la suite d'augmenter ou de compléter la base de donnée ou d'ajouter dans la base les références de certains constructeurs afin de comparer les performances. Il faudra cependant garantir que les associations moteur-réducteur sont physiquement réalisables.

On s'intéresse à déterminer d'abord le moteur et le réducteur de l'articulation des chevilles. Dans la première étape de la sélection, le programme développé va fournir l'ensemble des associations possibles. Toutes ces solutions (elles sont au nombre de 581) sont d'abord exploitées dans le plan (masse-rendement) comme le montre la figure ci-dessous.



On peut remarquer sur le graphique précédent que selon le rendement exigé, on sera obligé de choisir un ensemble moteur-réducteur plus ou moins lourd. Il existe donc un front de Pareto qu'il faut préciser. Si l'on désire un ensemble léger, on cherche dans la zone de masse inférieure à 1 kg puisqu'il existe 23 solutions. On peut par exemple établir la liste de tous les ensembles qui conviennent dans le début du graphique. Le programme nous donne les résultats suivants :

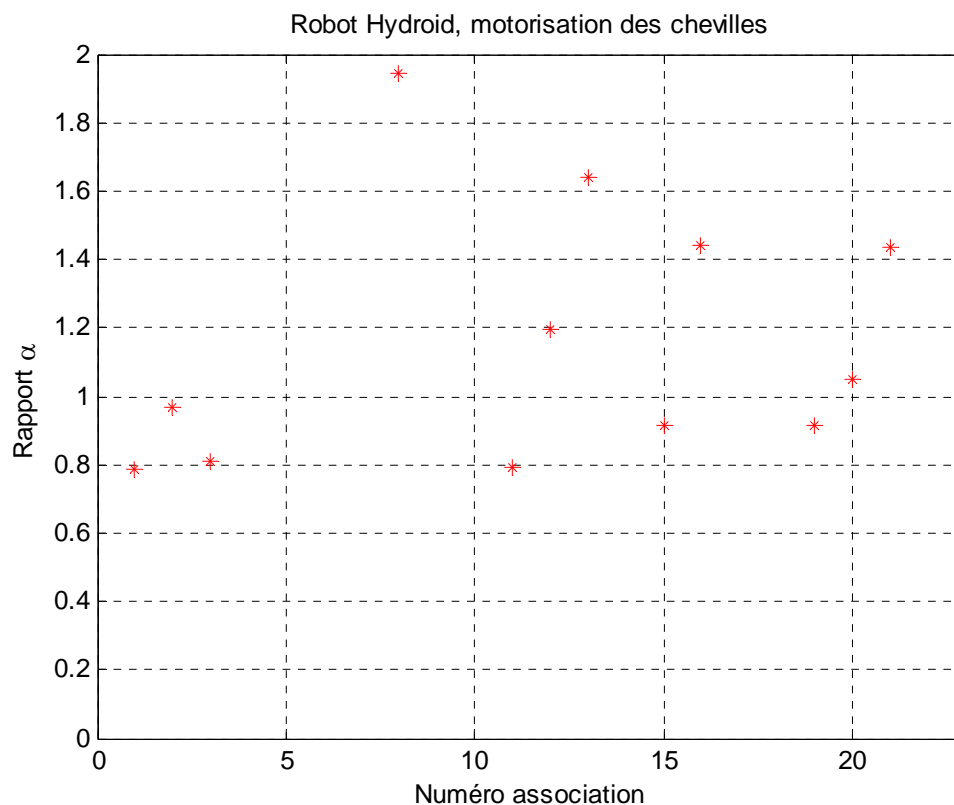
N°	Nom moteur	Réducteur	Masse	Rapport	Rendement	Alpha
1	EC_powermax30_305015	GP42C	M= 0.731	N=156	R=0.5656	A=0.7846
2	EC_powermax30_305015	GP42C	M= 0.731	N=150	R=0.5166	A=0.9690
3	EC_powermax30_305015	GP42C	M= 0.731	N=186	R=0.5054	A=0.8093

4	EC_powermax30_305015	HFUC202AGR	M= 0.551	N=160	R=0.5204	A=2.4398
5	EC_powermax30_305015	HFUC252AGR	M= 0.691	N=160	R=0.5204	A=4.4040
6	EC_powermax30_305015	CSG202AGR	M= 0.551	N=160	R=0.5204	A=3.0655
7	EC_powermax30_305015	CSG252AGR	M= 0.691	N=160	R=0.5204	A=5.6186
8	EC_powermax30_305015	CSD202AGR	M= 0.401	N=160	R=0.5075	A=1.9454
9	EC_powermax30_305015	CSD252AGR	M= 0.511	N=160	R=0.5075	A=3.4462
10	EC_powermax30_305015	CSD322AGR	M= 0.781	N=160	R=0.5075	A=7.0614
11	RE40_148877	HFUC142AR	M= 0.570	N=100	R=0.6365	A=0.7942
12	RE40_148877	HFUC172AR	M= 0.630	N=100	R=0.6365	A=1.1933
13	RE40_148877	HFUC202AGR	M= 0.760	N=100	R=0.6365	A=1.6416
14	RE40_148877	HFUC252AGR	M= 0.900	N=100	R=0.6365	A=2.8720
15	RE40_148877	CSG142AGR	M= 0.570	N=100	R=0.6365	A=0.9124
16	RE40_148877	CSG172AGR	M= 0.630	N=100	R=0.6365	A=1.4419
17	RE40_148877	CSG202AGR	M= 0.760	N=100	R=0.6365	A=2.0388
18	RE40_148877	CSG252AGR	M= 0.900	N=100	R=0.6365	A=3.6361
19	RE40_148877	CSG142AGR	M= 0.570	N=100	R=0.6365	A=0.9124
20	RE40_148877	CSD172AGR	M= 0.580	N=100	R=0.6050	A=1.0514
21	RE40_148877	CSD202AGR	M= 0.610	N=100	R=0.6050	A=1.4358
22	RE40_148877	CSD252AGR	M= 0.720	N=100	R=0.6050	A=2.4844
23	RE40_148877	CSD322AGR	M= 0.990	N=100	R=0.6050	A=4.9803

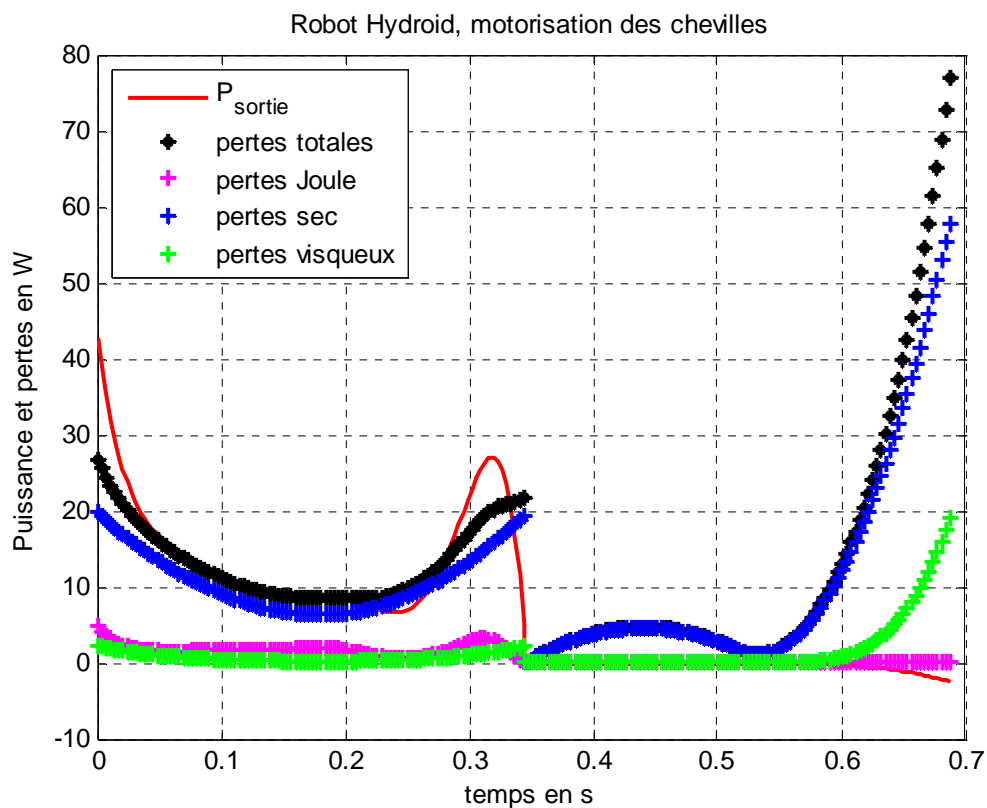
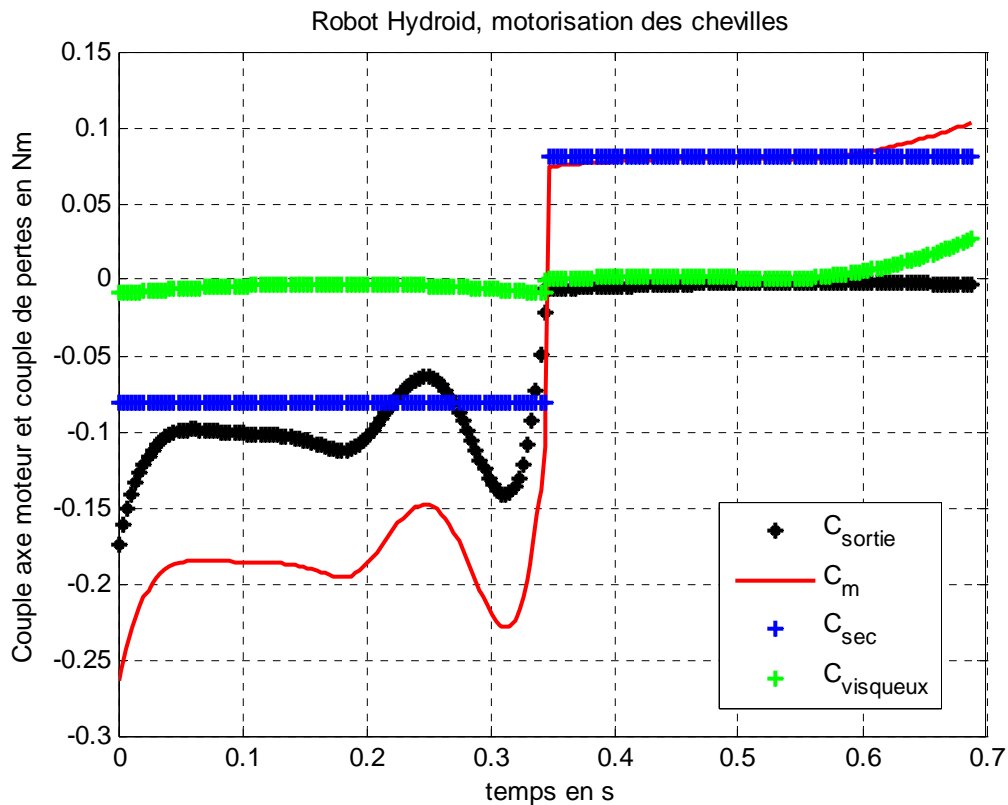
On peut remarquer que les configurations 4, 6, 8, 9, 11, 15, 19, et 20 ont une masse inférieure à 600 g. La masse la plus faible correspond à la solution 8 qui utilise le même moteur que 1 associé à un réducteur Harmonic Drive. Parmi les trois configurations 11, 15 et 19 qui ont le meilleur rendement, la configuration numéro 11 avec un moteur synchrone associé à un réducteur Harmonic Drive a le coefficient alpha le plus faible ce qui nous garantit une durée de vie la plus importante avec une fonctionnement permanent possible à vitesse maximale.

On peut retenir qui nous font donc compter avec une masse d'environ 0,57 kg pour l'actionneur des chevilles.

La courbe de α compris entre 0 et 2 pour toutes les configurations proposées par le programme de sélection donne :



Le moteur et le réducteur de la configuration 11 étant choisis, on peut maintenant étudier en détail les courbes de puissances, de pertes et déterminer les coefficients de pondération d'un critère énergétique.



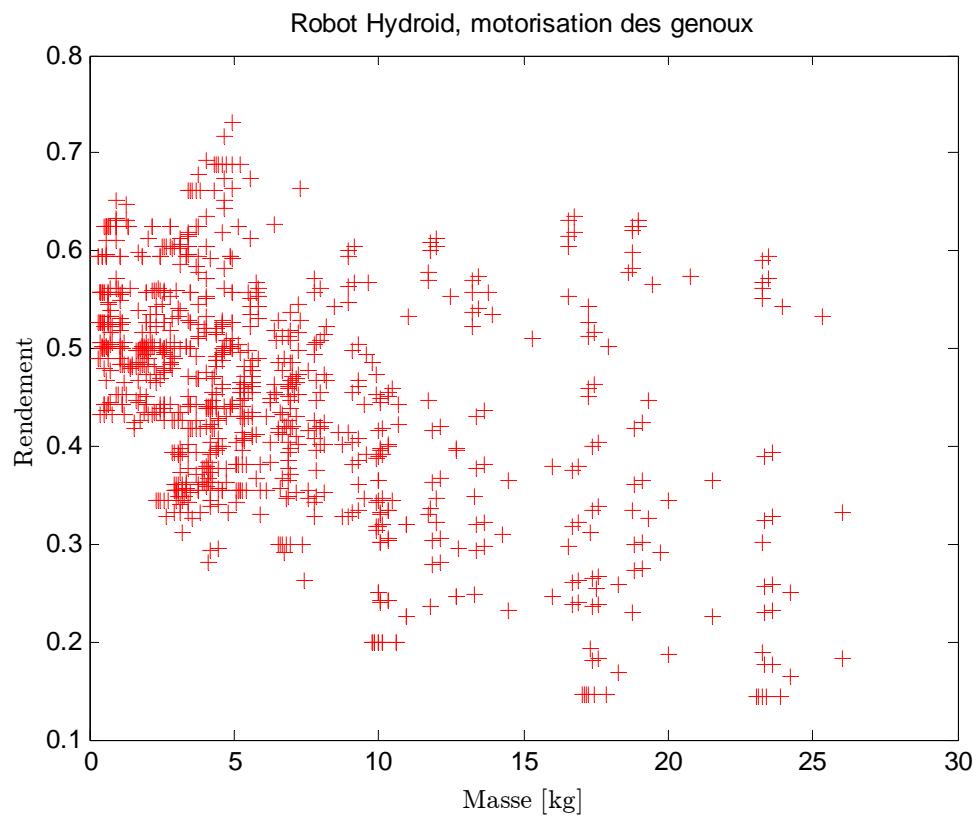
Les coefficients obtenus sont :

$$k_J = 0,016$$

$$C_s = 8,04$$

$$f_v = 0,367$$

Pour la motorisation de l'articulation du genou, on reprend la même méthodologie. Toutes ces solutions (elles sont au nombre de 924) sont d'abord exploitées dans le plan (masse-rendement) comme le montre la figure ci-dessous.

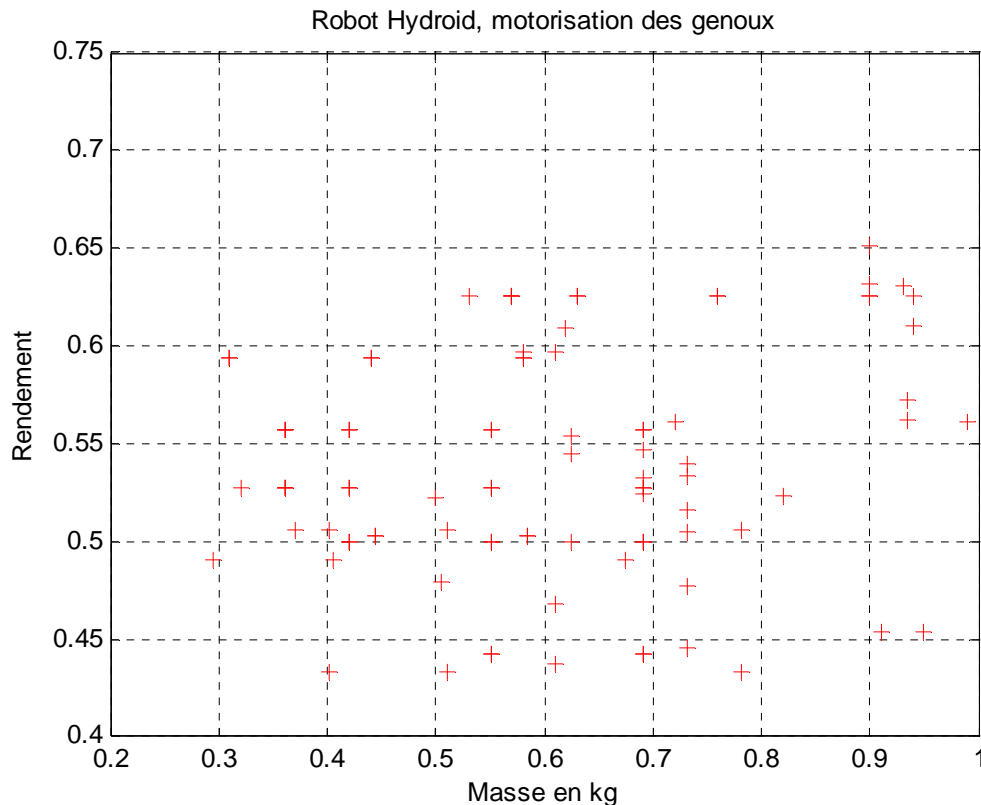


Si l'on désire un ensemble léger, on cherche dans la zone de masse inférieure à 1 kg puisqu'il existe 90 solutions. On peut par exemple établir la liste de tous les ensembles qui conviennent dans le début du graphique. Le programme nous donne les 60 premiers résultats suivants :

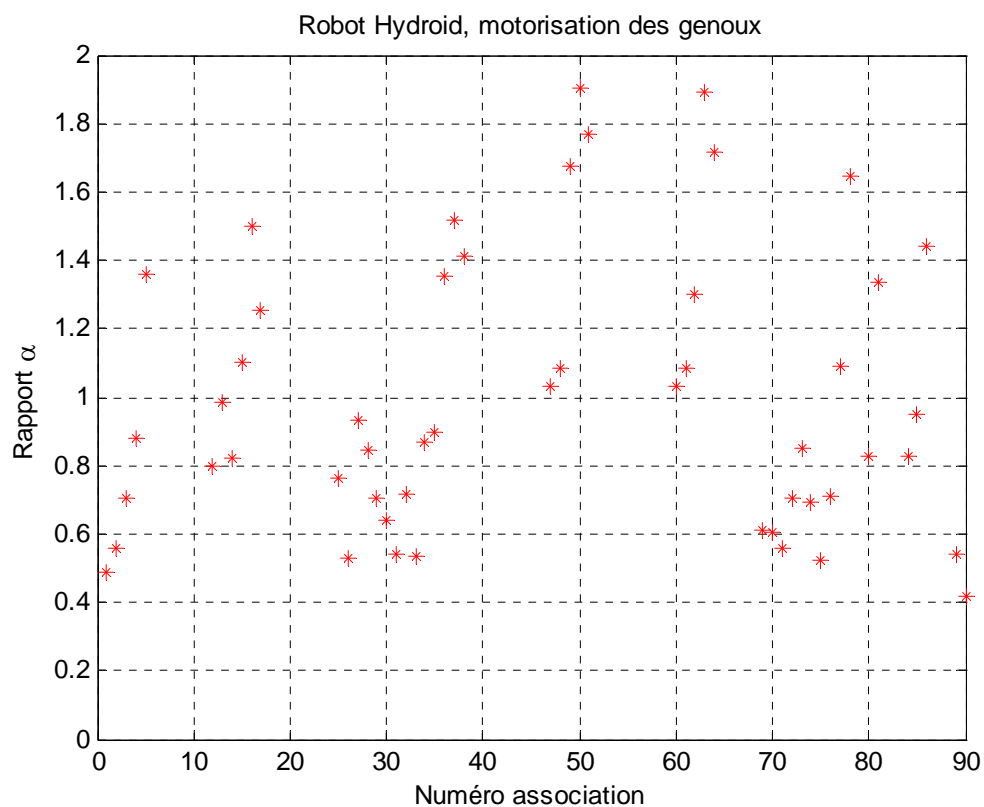
N°	Nom moteur	Réducteur	Masse	Rapport	Rendement	Alpha
1	RS230C	HFUC112AR	M= 0.910	N=30	R=0.4534	A=0.4869
2	RS230C	HFUC142AR	M= 0.950	N=30	R=0.4534	A=0.5610
3	EC_powermax22_311538	R40	M= 0.500	N=134	R=0.5226	A=0.7074
4	EC_powermax22_311538	GP42C	M= 0.620	N=126	R=0.6098	A=0.8778
5	EC_powermax22_311538	GP52C	M= 0.930	N=126	R=0.6312	A=1.3586
6	EC_powermax22_311538	HFUC172AR	M= 0.310	N=120	R=0.5936	A=2.0382
7	EC_powermax22_311538	HFUC202AGR	M= 0.440	N=120	R=0.5936	A=3.2019
8	EC_powermax22_311538	HFUC252AGR	M= 0.580	N=120	R=0.5936	A=6.0915
9	EC_powermax22_311538	CSG172AGR	M= 0.310	N=120	R=0.5936	A=2.5852
10	EC_powermax22_311538	CSG202AGR	M= 0.440	N=120	R=0.5936	A=4.1086
11	EC_powermax22_311538	CSG252AGR	M= 0.580	N=120	R=0.5936	A=7.8712
12	EC_powermax30_309756	R40	M= 0.505	N=134	R=0.4792	A=0.7996
13	EC_powermax30_309756	GP42C	M= 0.625	N=126	R=0.5545	A=0.9837
14	EC_powermax30_309756	GP42C	M= 0.625	N=156	R=0.5451	A=0.8199
15	EC_powermax30_309756	GP42C	M= 0.625	N=150	R=0.5000	A=1.1049
16	EC_powermax30_309756	GP52C	M= 0.935	N=126	R=0.5721	A=1.5015
17	EC_powermax30_309756	GP52C	M= 0.935	N=156	R=0.5622	A=1.2547
18	EC_powermax30_309756	HFUC202AGR	M= 0.445	N=160	R=0.5026	A=3.5417
19	EC_powermax30_309756	HFUC252AGR	M= 0.585	N=160	R=0.5026	A=6.7531
20	EC_powermax30_309756	CSG202AGR	M= 0.445	N=160	R=0.5026	A=4.5647
21	EC_powermax30_309756	CSG252AGR	M= 0.585	N=160	R=0.5026	A=8.7363
22	EC_powermax30_309756	CSD202AGR	M= 0.295	N=160	R=0.4905	A=2.7324
23	EC_powermax30_309756	CSD252AGR	M= 0.405	N=160	R=0.4905	A=5.1882
24	EC_powermax30_309756	CSD322AGR	M= 0.675	N=160	R=0.4905	A=11.098
25	EC_powermax30_305015	R40	M= 0.611	N=85.3	R=0.4676	A=0.7639

26	EC_powermax30_305015	R40	M= 0.611	N=134	R=0.4370	A=0.5291
27	EC_powermax30_305015	GP42C	M= 0.731	N=81	R=0.5395	A=0.9332
28	EC_powermax30_305015	GP42C	M= 0.731	N=91	R=0.5339	A=0.8438
29	EC_powermax30_305015	GP42C	M= 0.731	N=113	R=0.5164	A=0.7030
30	EC_powermax30_305015	GP42C	M= 0.731	N=126	R=0.5047	A=0.6430
31	EC_powermax30_305015	GP42C	M= 0.731	N=156	R=0.4774	A=0.5429
32	EC_powermax30_305015	GP42C	M= 0.731	N=150	R=0.4455	A=0.7187
33	EC_powermax30_305015	HFUC112AR	M= 0.321	N=100	R=0.5273	A=0.5331
34	EC_powermax30_305015	HFUC142AR	M= 0.361	N=80	R=0.5566	A=0.8664
35	EC_powermax30_305015	HFUC142AR	M= 0.361	N=100	R=0.5273	A=0.9005
36	EC_powermax30_305015	HFUC172AR	M= 0.421	N=80	R=0.5566	A=1.3525
37	EC_powermax30_305015	HFUC172AR	M= 0.421	N=100	R=0.5273	A=1.5196
38	EC_powermax30_305015	HFUC172AR	M= 0.421	N=120	R=0.5001	A=1.4095
39	EC_powermax30_305015	HFUC202AGR	M= 0.551	N=80	R=0.5566	A=2.1445
40	EC_powermax30_305015	HFUC202AGR	M= 0.551	N=100	R=0.5273	A=2.2118
41	EC_powermax30_305015	HFUC202AGR	M= 0.551	N=120	R=0.5001	A=2.1743
42	EC_powermax30_305015	HFUC202AGR	M= 0.551	N=160	R=0.4425	A=2.2126
43	EC_powermax30_305015	HFUC252AGR	M= 0.691	N=80	R=0.5566	A=3.8040
44	EC_powermax30_305015	HFUC252AGR	M= 0.691	N=100	R=0.5273	A=4.1033
45	EC_powermax30_305015	HFUC252AGR	M= 0.691	N=120	R=0.5001	A=4.0719
46	EC_powermax30_305015	HFUC252AGR	M= 0.691	N=160	R=0.4425	A=4.1795
47	EC_powermax30_305015	CSG142AGR	M= 0.361	N=80	R=0.5566	A=1.0299
48	EC_powermax30_305015	CSG142AGR	M= 0.361	N=100	R=0.5273	A=1.0843
49	EC_powermax30_305015	CSG172AGR	M= 0.421	N=80	R=0.5566	A=1.6767
50	EC_powermax30_305015	CSG172AGR	M= 0.421	N=100	R=0.5273	A=1.9041
51	EC_powermax30_305015	CSG172AGR	M= 0.421	N=120	R=0.5001	A=1.7691
52	EC_powermax30_305015	CSG202AGR	M= 0.551	N=80	R=0.5566	A=2.7088
53	EC_powermax30_305015	CSG202AGR	M= 0.551	N=100	R=0.5273	A=2.8236
54	EC_powermax30_305015	CSG202AGR	M= 0.551	N=120	R=0.5001	A=2.7698
55	EC_powermax30_305015	CSG202AGR	M= 0.551	N=160	R=0.4425	A=2.8393
56	EC_powermax30_305015	CSG252AGR	M= 0.691	N=80	R=0.5566	A=4.8765
57	EC_powermax30_305015	CSG252AGR	M= 0.691	N=100	R=0.5273	A=5.2756
58	EC_powermax30_305015	CSG252AGR	M= 0.691	N=120	R=0.5001	A=5.2406
59	EC_powermax30_305015	CSG252AGR	M= 0.691	N=160	R=0.4425	A=5.3943
60	EC_powermax30_305015	CSG142AGR	M= 0.361	N=80	R=0.5566	A=1.0299
61	EC_powermax30_305015	CSG142AGR	M= 0.361	N=100	R=0.5273	A=1.0843
62	EC_powermax30_305015	CSD172AGR	M= 0.371	N=100	R=0.5055	A=1.2996
63	EC_powermax30_305015	CSD202AGR	M= 0.401	N=100	R=0.5055	A=1.8942
64	EC_powermax30_305015	CSD202AGR	M= 0.401	N=160	R=0.4331	A=1.7169
65	EC_powermax30_305015	CSD252AGR	M= 0.511	N=100	R=0.5055	A=3.5080
66	EC_powermax30_305015	CSD252AGR	M= 0.511	N=160	R=0.4331	A=3.2210
67	EC_powermax30_305015	CSD322AGR	M= 0.781	N=100	R=0.5055	A=7.3364
68	EC_powermax30_305015	CSD322AGR	M= 0.781	N=160	R=0.4331	A=6.8407
69	EC_powermax30_305015	HDUC141UCC	M= 0.691	N=88	R=0.5468	A=0.6126
70	EC_powermax30_305015	HDUC141UCC	M= 0.691	N=100	R=0.5326	A=0.6049
71	EC_powermax30_305015	HDUC141UCC	M= 0.691	N=110	R=0.5242	A=0.5602
72	RE40_148877	R40	M= 0.820	N=54.2	R=0.5234	A=0.7060
73	RE40_148877	GP42C	M= 0.940	N=53	R=0.6103	A=0.8525
74	RE40_148877	GP42C	M= 0.940	N=66	R=0.6255	A=0.6923
75	RE40_148877	HFUC112AR	M= 0.530	N=50	R=0.6254	A=0.5224
76	RE40_148877	HFUC142AR	M= 0.570	N=50	R=0.6254	A=0.7131
77	RE40_148877	HFUC172AR	M= 0.630	N=50	R=0.6254	A=1.0898
78	RE40_148877	HFUC202AGR	M= 0.760	N=50	R=0.6254	A=1.6484
79	RE40_148877	HFUC252AGR	M= 0.900	N=50	R=0.6254	A=2.7557
80	RE40_148877	CSG142AGR	M= 0.570	N=50	R=0.6254	A=0.8248
81	RE40_148877	CSG172AGR	M= 0.630	N=50	R=0.6254	A=1.3381
82	RE40_148877	CSG202AGR	M= 0.760	N=50	R=0.6254	A=2.0873
83	RE40_148877	CSG252AGR	M= 0.900	N=50	R=0.6254	A=3.5212
84	RE40_148877	CSG142AGR	M= 0.570	N=50	R=0.6254	A=0.8248
85	RE40_148877	CSD172AGR	M= 0.580	N=50	R=0.5973	A=0.9490
86	RE40_148877	CSD202AGR	M= 0.610	N=50	R=0.5973	A=1.4388
87	RE40_148877	CSD252AGR	M= 0.720	N=50	R=0.5615	A=2.9833
88	RE40_148877	CSD322AGR	M= 0.990	N=50	R=0.5615	A=6.3919
89	RE40_148877	HDUC141UCC	M= 0.900	N=50	R=0.6323	A=0.5422

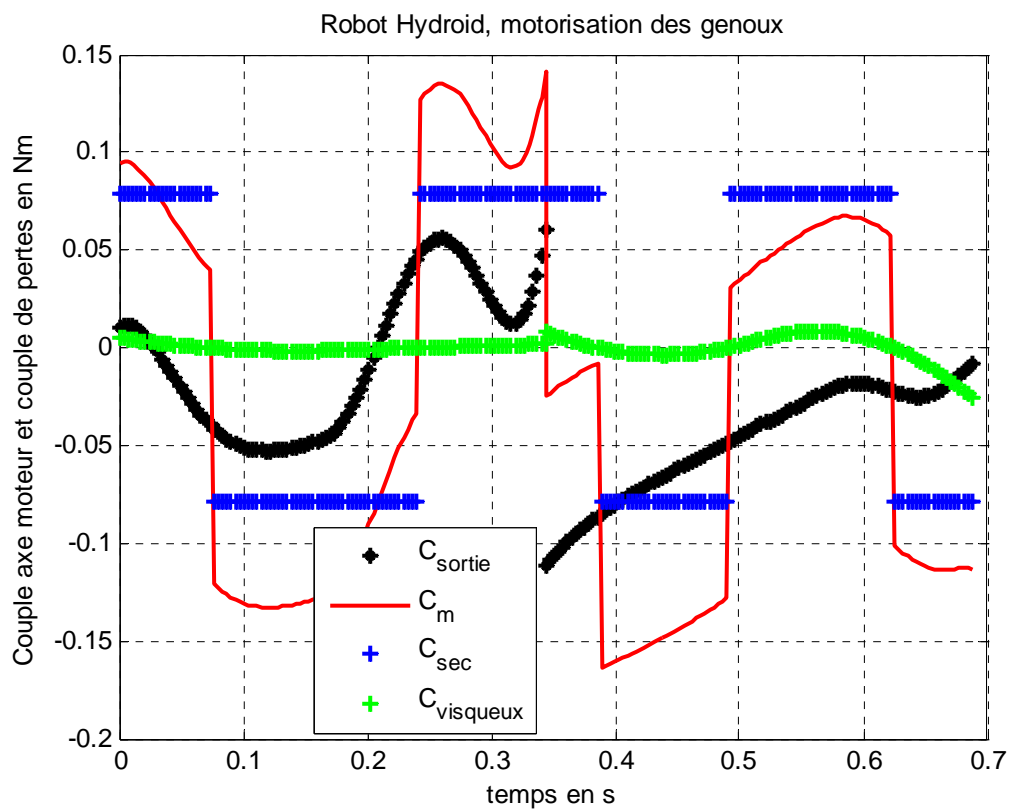
La figure suivante donne le détail de la courbe de rendement pour les 90 configurations précédentes ayant une masse inférieure à 1 kg.

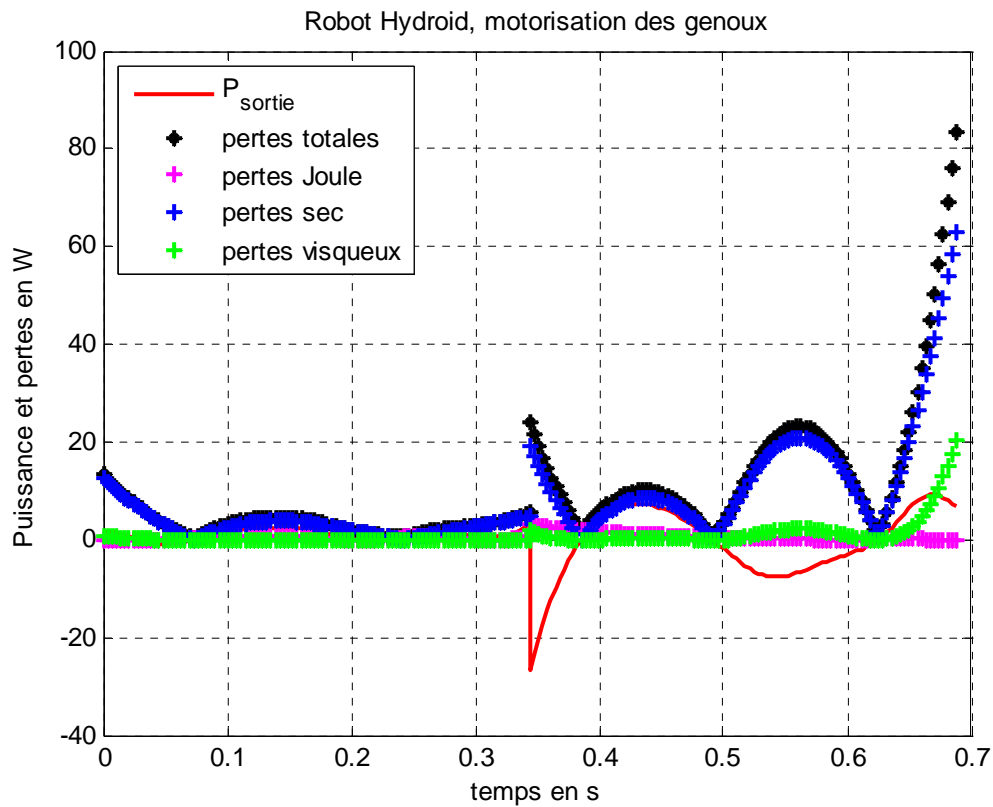


Pour des solutions ayant une masse inférieure à 400 g, on a les configurations 6, 9, 22, 33, 34, 35, 47, 48, 60, 61 et 62. On peut remarquer que la configuration 34 a un rendement acceptable et de plus elle présente un coefficient alpha proche de 1 donc le robot peut être utilisé à la vitesse maximale de 1 m/s sans risque de dépassement de la température limite de fonctionnement. Les configurations 6 et 9 ont un rendement meilleur, mais elles présentent des coefficients alpha trop grand et donc le robot ne serait pas capable d'exécuter une allure à vitesse maximale pendant une durée supérieure à quelques minutes. Afin d'argumenter le choix de la meilleure configuration, on peut également tracer la courbe de alpha pour toutes les configurations proposées par le programme de sélection. On obtient :



Le moteur et le réducteur de la configuration 34 étant choisis, on peut maintenant étudier en détail les courbes de puissances, de pertes et déterminer les coefficients de pondération d'un critère énergétique.





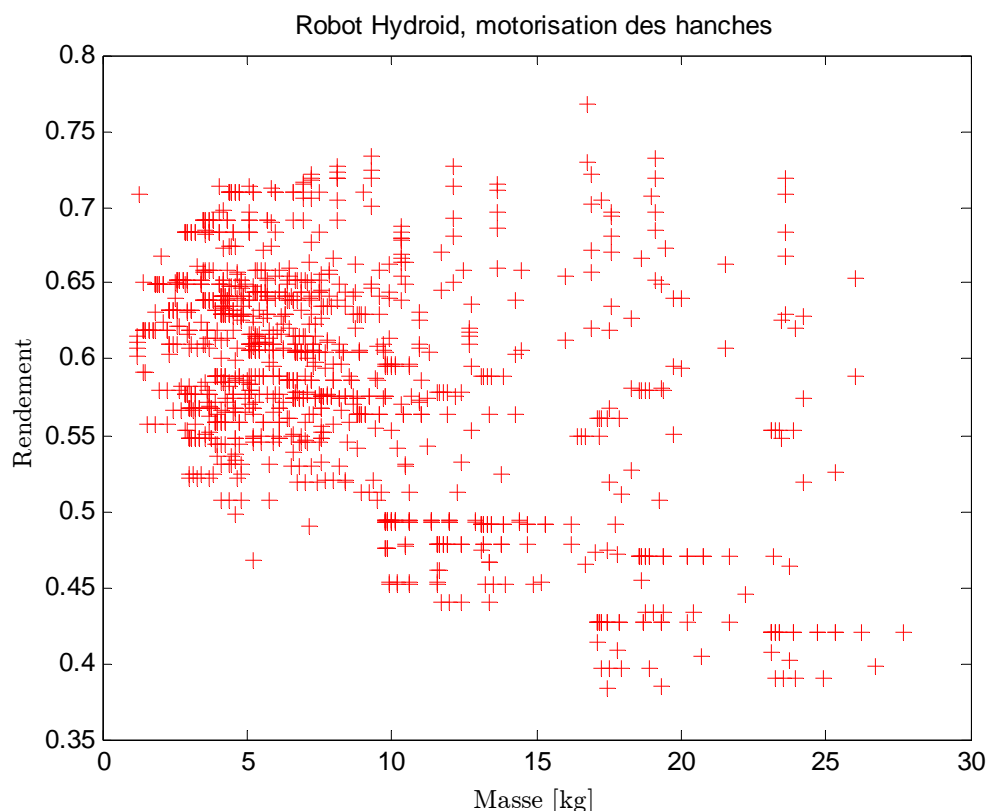
Les coefficients obtenus sont :

$$kJ = 0,0396$$

$$Cs = 6,30$$

$$fv = 0,207$$

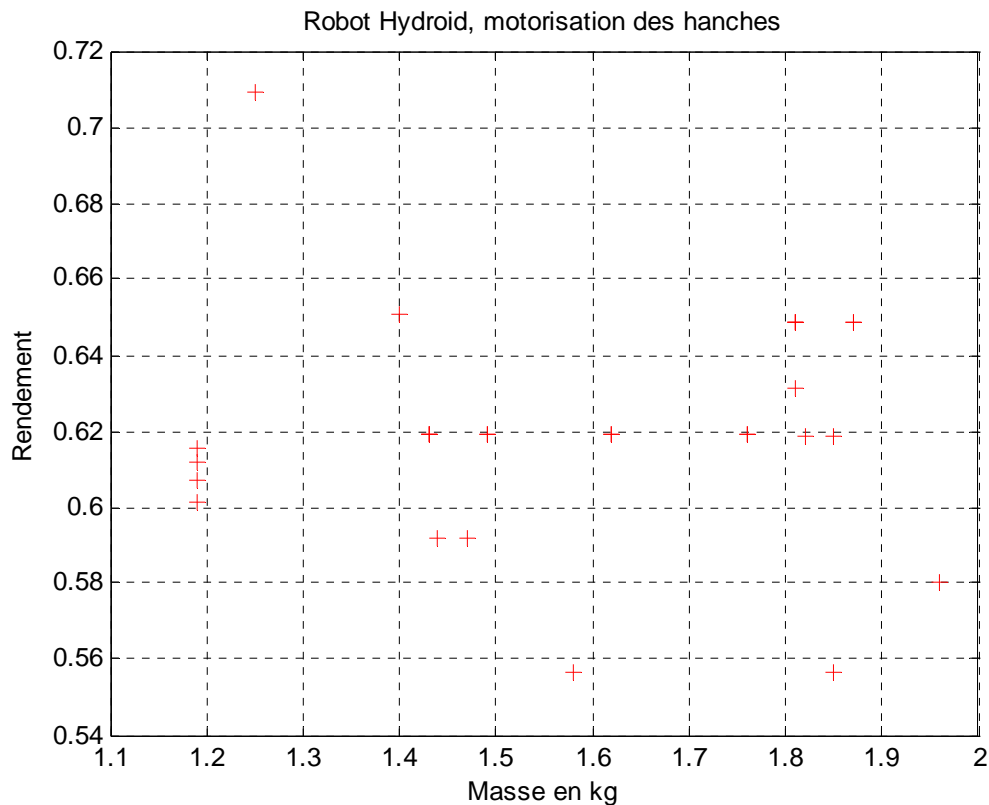
Pour la motorisation de l'articulation de la hanche, on reprend la même méthodologie. Toutes ces solutions (elles sont au nombre de 1081) sont d'abord exploitées dans le plan (masse-rendement) comme le montre la figure ci-dessous.



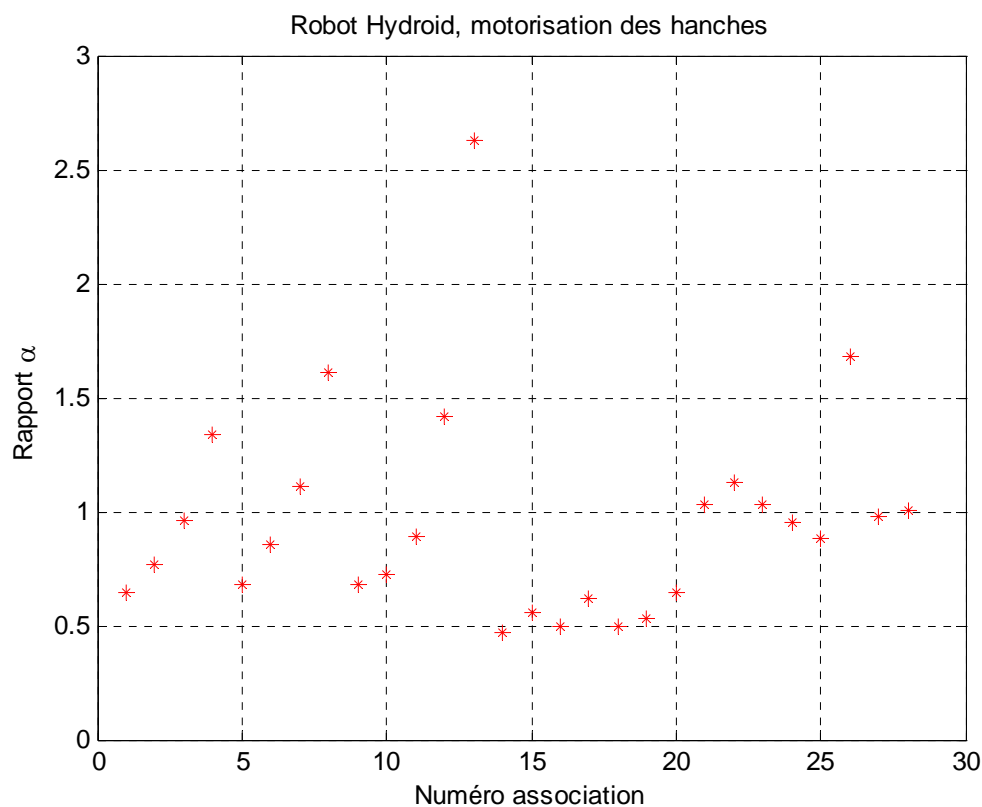
Si l'on désire un ensemble léger, on cherche dans la zone de masse inférieure à 2 kg puisqu'il existe 28 solutions. On peut par exemple établir la liste de tous les ensembles qui conviennent dans le début du graphique. Le programme nous donne les résultats suivants :

N°	Nom moteur	Réducteur	Masse	Rapport	Rendement	Alpha
1	RS320H	HFUC142AR	M= 1.430	N=50	R=0.6193	A=0.6438
2	RS320H	HFUC172AR	M= 1.490	N=50	R=0.6193	A=0.7710
3	RS320H	HFUC202AGR	M= 1.620	N=50	R=0.6193	A=0.9590
4	RS320H	HFUC252AGR	M= 1.760	N=50	R=0.6193	A=1.3404
5	RS320H	CSG142AGR	M= 1.430	N=50	R=0.6193	A=0.6819
6	RS320H	CSG172AGR	M= 1.490	N=50	R=0.6193	A=0.8539
7	RS320H	CSG202AGR	M= 1.620	N=50	R=0.6193	A=1.1083
8	RS320H	CSG252AGR	M= 1.760	N=50	R=0.6193	A=1.6074
9	RS320H	CSG142AGR	M= 1.430	N=50	R=0.6193	A=0.6819
10	RS320H	CSD172AGR	M= 1.440	N=50	R=0.5918	A=0.7241
11	RS320H	CSD202AGR	M= 1.470	N=50	R=0.5918	A=0.8884
12	RS320H	CSD252AGR	M= 1.580	N=50	R=0.5566	A=1.4195
13	RS320H	CSD322AGR	M= 1.850	N=50	R=0.5566	A=2.6261
14	RS330E	HFUC142AR	M= 1.810	N=50	R=0.6487	A=0.4682
15	RS330E	HFUC172AR	M= 1.870	N=50	R=0.6487	A=0.5603
16	RS330E	CSG142AGR	M= 1.810	N=50	R=0.6487	A=0.4958
17	RS330E	CSG172AGR	M= 1.870	N=50	R=0.6487	A=0.6203
18	RS330E	CSG142AGR	M= 1.810	N=50	R=0.6487	A=0.4958
19	RS330E	CSD172AGR	M= 1.820	N=50	R=0.6186	A=0.5263
20	RS330E	CSD202AGR	M= 1.850	N=50	R=0.6186	A=0.6452
21	RS330E	CSD252AGR	M= 1.960	N=50	R=0.5803	A=1.0290
22	EC_powermax30_305015	GP52C	M= 1.191	N=230	R=0.6156	A=1.1249
23	EC_powermax30_305015	GP52C	M= 1.191	N=257	R=0.6118	A=1.0322
24	EC_powermax30_305015	GP52C	M= 1.191	N=285	R=0.6073	A=0.9547
25	EC_powermax30_305015	GP52C	M= 1.191	N=319	R=0.6015	A=0.8791
26	EC_powermax30_305015	GP62	M= 1.811	N=236	R=0.6311	A=1.6795
27	RE40_148877	GP52C	M= 1.250	N=126	R=0.7091	A=0.9757
28	RE40_148877	GP52C	M= 1.400	N=150	R=0.6506	A=1.0036

La figure suivante donne le détail de la courbe de rendement pour les 28 configurations précédentes ayant la masse la plus faible.



On peut remarquer que la configuration 27 a un bon rendement et de plus elle présente un coefficient alpha proche de 1 donc le robot peut être utilisé à la vitesse maximale de 1 m/s sans risque de dépassement de la température limite de fonctionnement. Afin d'argumenter le choix de la meilleure configuration, on peut également tracer la courbe de alpha pour toutes les configurations proposées par le programme de sélection.

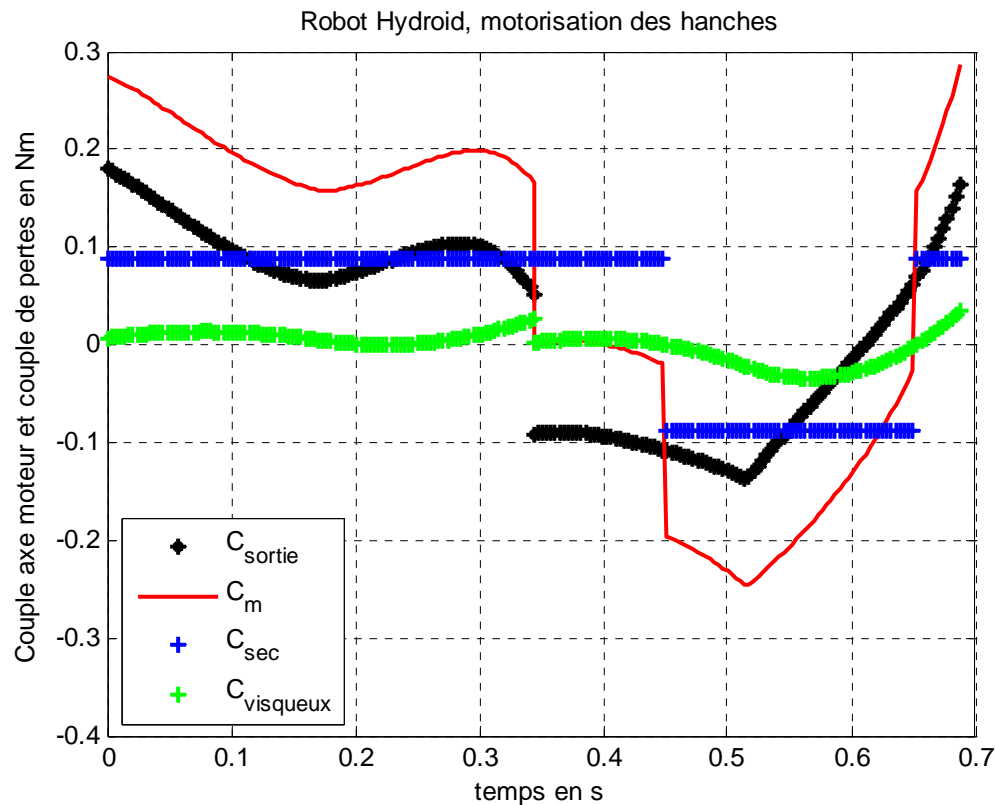


Cette courbe montre clairement que les configurations 4, 8, 12, 13 et 26 sont exclues car elle entraînerait un arrêt assez rapide du robot lorsque l'on demande la vitesse maximale. Pour les

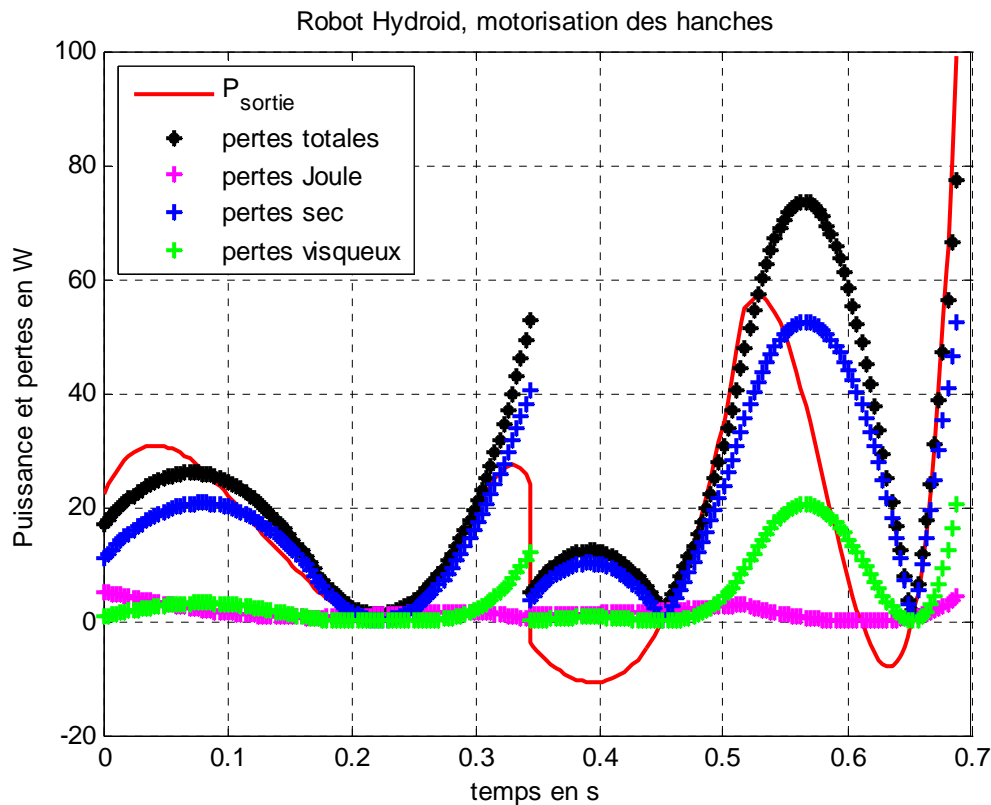
configurations 7, 21, 22, 23 et 28 où le coefficient alpha est légèrement plus grand que 1, une solution peut être trouvée si l'on suppose que la vitesse maximale ne sera pas souvent utilisée ou alors pour une durée faible (environ 10 mn).

Sinon, la configuration qui présente un coefficient alpha juste inférieur à 1 et un rendement maximal est la numéro 27. C'est donc celle là que l'on propose pour la suite.

Le moteur et le réducteur étant choisis, on peut maintenant étudier en détail les courbes de puissances, de pertes et déterminer les coefficients de pondération d'un critère énergétique.



Globalement, pour l'ensemble des solutions proposées, les rapports de réduction des réducteurs sont relatives faibles, ce qui nous assure une bonne réversibilité.



Les coefficients obtenus sont :

$$k_J = 0,01$$

$$C_s = 11,02$$

$$f_v = 0,902$$

6 Conclusion

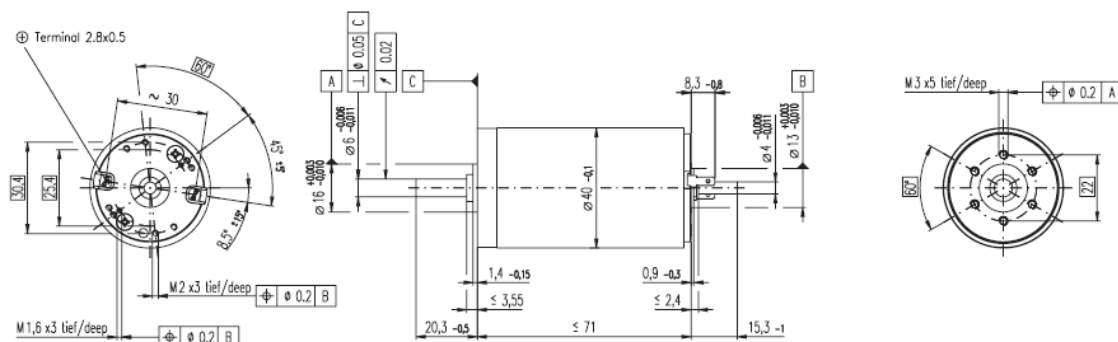
La première partie des résultats a montré qu'il n'est pas très réaliste de choisir les actionneurs à partir d'une unique mode de fonctionnement à charge maximale. Cette démarche conduit à sur-dimensionner les actionneurs, ce qui pénalise la conception globale du robot du fait d'une masse total des actionneurs bien supérieure à la masse d'ensemble prévue pour le robot.

A partir de cette première analyse, il est alors possible de modifier la sélection au intégrant la loi de commande des actionneurs hydrauliques et la commande de stockage d'énergie. Ceci introduit un problème supplémentaire de choix concomitant de la loi de commande, du fonctionnement du moteur électrique associé à l'actionneur hydraulique et des tâches du robot.

Enfin une autre démarche a été adoptée consistant à définir l'ensemble des trajectoires admissibles pour le robot, puis d'en déduire les points de fonctionnement limites et de sélectionner les actionneurs électriques et les transmissions mécaniques associés à l'aide de la méthodologie développée. Ceci a conduit aux choix des meilleures associations d'actionneurs-transmissions pour chaque articulation des jambes du robot. Ce résultat avec des associations de masse de l'ordre du kilogramme est tout à fait compatible avec les masses prévues au départ dans la définition du modèle dynamique du robot. De plus, la solution proposé nous permet de définir un modèle de pertes énergétiques globales des actionneurs, modèle qui peut être utilisé par la suite dans l'optimisation de trajectoire et dans la commande.

Annexe

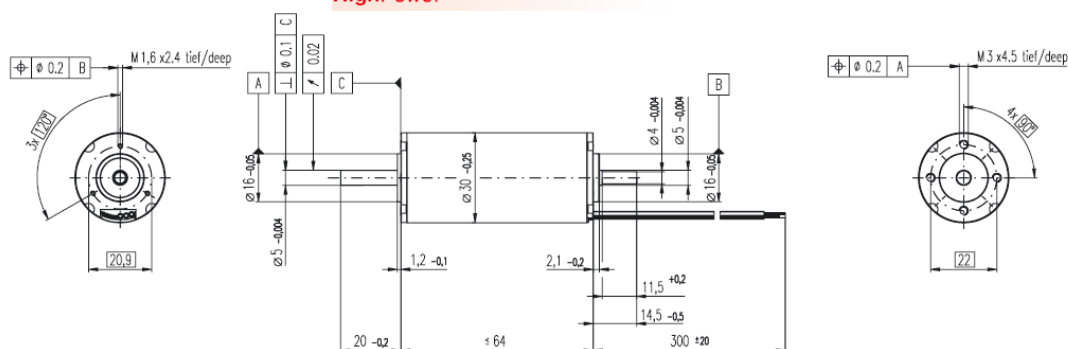
Caractéristiques du moteur RE40 :

RE 40 Ø40 mm, Commutation Graphite, 150 Watt

EC-powermax 30 Ø30 mm, à commutation électronique, 200 Watt

NEW

maxon EC-max



M 1:2

- Programme Stock
- Programme Standard
- Programme Spécial (sur demande!)

Numéros de commande

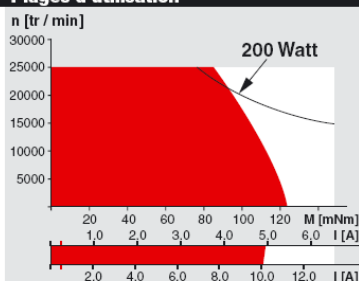
		305013	305014	305015				
Caractéristiques moteur (provisoires)								
1	Puissance conseillée	W	200	200	200			
2	Tension nominale	Volt	24.0	36.0	48.0			
3	Vitesse à vide ¹⁾	tr / min	17000	17000	17000			
4	Couple de démarrage ¹⁾	mNm	4050	3750	3780			
5	Pente vitesse / couple ¹⁾	tr / min / mNm	4.2	4.54	4.5			
6	Courant à vide ¹⁾	mA	488	325	244			
7	Résistance aux bornes (phase-phase)	Ohm	0.080	0.193	0.341			
8	Vitesse limite	tr / min	25000	25000	25000			
9	Courant permanent max. à 5000 tr / min ¹⁾	mA	10100	6560	4940			
10	Couple permanent max. à 5000 tr / min	mNm	116	112	113			
11	Rendement max. ¹⁾	%	92	92	92			
12	Constante de couple	mNm / A	13.5	20.2	26.9			
13	Constante de vitesse	tr / min / V	710	473	355			
14	Constante de temps mécanique	ms	1.34	1.45	1.43			
15	Inertie du rotor	gcm²	30.4	30.4	30.4			
16	Inductivité (phase-phase)	mH	0.026	0.058	0.102			
17	Résistance therm. carcasse / air ambiant	K / W	5.7	5.7	5.7			
18	Résistance therm. bobinage / carcasse	K / W	0.05	0.05	0.05			
19	Constante de temps thermique du bobinage	s	0.3	0.3	0.3			
20	Constante de temps thermique du stator	s	918	918	918			

1) Valeurs déterminées avec la commutation de bloc

Spécifications

- Jeu axial sous charge axiale < 8 N 0 mm
- **Roulements** pré-contraint
Pré-contraint min. 8 N
- Charge maximum des **roulements** axiale (dynamique) 7 N
radiale (à 5 mm de la face) 25 N
Force de chassage (statique, axe soutenu) 1200 N
- Température ambiante -40 ... +100°C
- Température bobinage max. +155°C
- Poids du moteur 270 g
- Aimant permanent à 4 pôles
- Les caractéristiques moteur du tableau sont des valeurs nominales.
- **Connexions** (Câble AWG 18)
 - noir Bobinage 2 du moteur
 - blanc Bobinage 3 du moteur
 - rouge Bobinage 1 du moteur
- **Connexions** (Câble AWG 26)
 - blanc / gris Capteurs Hall 3
 - vert V_{Hall} 4.5 ... 24 VDC
 - bleu GND
 - noir / gris Capteurs Hall 2
 - rouge / gris Capteurs Hall 1

Plages d'utilisation



Légende

- Courbe de la puissance constante assignable

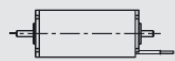
Plage de fonctionnement permanent
Compte tenu des résistances thermiques (lignes 17 et 18) la température maximum du rotor peut être atteinte au valeur nominal de couple et vitesse et à la température ambiante de 25°C.
= Limite thermique.

Fonctionnement intermittent
La surcharge doit être de courte durée.

— 305015 Moteur avec bobinage à haute résistance
— 305013 Moteur avec bobinage à basse résistance

Construction modulaire maxon

Réducteur planétaire
 Ø42 mm
 3 - 15 Nm
 Voir page 225



Electronique recommandée:	
DEC 70/10	page 266
DES 70/10	268
EPOS 70/10	271
MIP 100	273
Informations	17

Aperçu à la page 17 - 21

Codeur MR
500 / 1000 imp.,
3 canaux
Voir page 238

Codeur HEDL 5
500 imp.,
3 canaux
Voir page 246

Frein AB
Ø20 mm
24 VDC, 0.1 Nm
Voir page 278

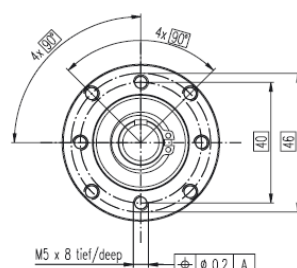
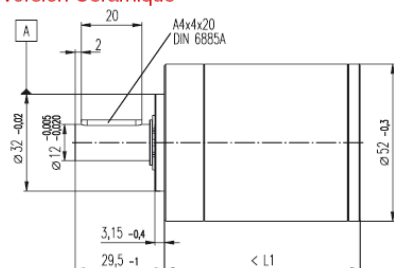
176 maxon EC motor

Edition : Juillet 2005 / Modifications réservées

Caractéristiques des réducteurs GP52C

Réducteur planétaire GP 52 C Ø52 mm, 4 - 30 Nm

Version Céramique



M 1:2

Données techniques

Réducteur planétaire	taille droite
Arbre de sortie	acier inoxydable
Palier de sortie	roulements pré-contraint
Jeu radial à 12 mm de la face	max. 0.06 mm
Jeu axial sous charge axiale	< 5 N 0 mm
	> 5 N max. 0.3 mm
Charge axiale max.	200 N
Force de chassage max.	500 N
Sens de rotation entrée / sortie	=
Vitesse d'entrée conseillée	< 6000 tr / min
Plage de température conseillée	-20 ... +100°C
Domaine étendu en option	-35 ... +100°C
Nombre d'étages	1 2 3 4
Charge radiale max. à 12 mm de la face	500 N 700 N 900 N 900 N

maxon gear

- Programme Stock
- Programme Standard
- Programme Spécial (sur demande!)

Numéros de commande**Données sur les réducteurs**

	223080	223083	223089	223094	223097	223104	223109
1 Rapport de réduction	3.5 : 1	12 : 1	43 : 1	91 : 1	150 : 1	319 : 1	546 : 1
2 Rapport de réduction exact	7/2	40/4	343/8	91	2401/16	637/2	546
3 Moment d'inertie	gcm ² 20.7	17.6	17.3	16.7	17.3	16.8	16.4
4 Diamètre max. de l'arbre du moteur	mm 10	10	10	10	10	10	10
Numéros de commande	223081	223084	223090	223095	223099	223105	223110
1 Rapport de réduction	4.3 : 1	15 : 1	53 : 1	113 : 1	186 : 1	353 : 1	676 : 1
2 Rapport de réduction exact	13/3	91/6	637/12	339/3	4459/24	28561/81	676
3 Moment d'inertie	gcm ² 12	16.8	17.2	9.3	17.3	9.4	9.1
4 Diamètre max. de l'arbre du moteur	mm 8	10	10	8	10	8	8
Numéros de commande	223085	223091	223096	223101	223106	223111	
1 Rapport de réduction	19 : 1	66 : 1	126 : 1	230 : 1	394 : 1	756 : 1	
2 Rapport de réduction exact	169/9	1183/18	126	8281/36	1183/3	756	
3 Moment d'inertie	gcm ² 9.5	16.7	16.4	16.8	16.7	16.4	
4 Diamètre max. de l'arbre du moteur	mm 8	10	10	10	10	10	
Numéros de commande	223086	223092	223098	223102	223107	223112	
1 Rapport de réduction	21 : 1	74 : 1	156 : 1	257 : 1	441 : 1	936 : 1	
2 Rapport de réduction exact	21	147/2	156	1029/4	441	936	
3 Moment d'inertie	gcm ² 16.5	17.2	9.1	17.3	16.5	9.1	
4 Diamètre max. de l'arbre du moteur	mm 10	10	8	10	10	8	
Numéros de commande	223087	223093		223103	223108		
1 Rapport de réduction	26 : 1	81 : 1		285 : 1	488 : 1		
2 Rapport de réduction exact	26	2197/27		15379/54	4394/9		
3 Moment d'inertie	gcm ² 9.1	9.4		16.7	9.4		
4 Diamètre max. de l'arbre du moteur	mm 8	8		10	8		
5 Nombre d'étages	1	2	3	4	4	4	
6 Couple permanent max.	Nm 4	15	30	30	30	30	
7 Couple intermittent max. admissible	Nm 6	22.5	45	45	45	45	
8 Rendement max.	% 91	83	75	75	68	68	
9 Poids	g 460	620	770	770	920	920	
10 Jeu moyen à vide	° 0.6	0.8	1.0	1.0	1.0	1.0	
11 Longueur du réducteur L1	mm 49.0	65.0	78.5	78.5	92.0	92.0	

**Combinaison**

+ Moteur	Page	+ Génér. / Codeur	Page	+ Frein	Page	Longueur totale [mm]	= longueur du moteur + longueur du réducteur + (génér. / codeur / frein) + pièces de montage			
RE 40, 150 W 83						120.1 136.1 149.6 149.6 163.1 163.1 163.1				
RE 40, 150 W 83		MR	239			131.5 147.5 161.0 161.0 174.5 174.5 174.5				
RE 40, 150 W 83		HED_ 5540	242/244			140.8 156.8 170.3 170.3 183.8 183.8 183.8				
RE 40, 150 W 83		HEDL 9140	247			174.1 190.1 203.6 203.6 217.1 217.1 217.1				
RE 40, 150 W 83				AB 40	279	156.2 172.2 185.7 185.7 199.2 199.2 199.2				
RE 40, 150 W 83				AB 28	280	164.1 180.1 193.6 193.6 207.1 207.1 207.1				
RE 40, 150 W 83		HED_ 5540	242/244	AB 40	279	173.3 189.3 202.8 202.8 216.3 216.3 216.3				
RE 40, 150 W 83		HEDL 9140	247	AB 28	280	184.6 200.6 214.1 214.1 227.6 227.6 227.6				
EC 40, 120 W 160						119.1 135.1 148.6 148.6 162.1 162.1 162.1				
EC 40, 120 W 160		HED_ 5540	243/245			137.5 153.5 167.0 167.0 180.5 180.5 180.5				
EC 40, 120 W 160		Res 26	253			145.7 161.7 175.2 175.2 188.7 188.7 188.7				
EC 40, 120 W 160				AB 40	279	149.9 165.9 179.4 179.4 192.9 192.9 192.9				
EC 45, 150 W 161						160.3 176.3 189.8 189.8 203.3 203.3 203.3				
EC 45, 150 W 161		HEDL 9140	247			175.9 191.9 205.4 205.4 218.9 218.9 218.9				
EC 45, 150 W 161		Res 26	253			160.3 176.3 189.8 189.8 203.3 203.3 203.3				
EC 45, 150 W 161				AB 28	280	167.7 183.7 197.2 197.2 210.7 210.7 210.7				
EC 45, 150 W 161		HEDL 9140	247	AB 28	280	184.7 200.7 214.2 214.2 227.7 227.7 227.7				
EC 45, 250 W 162						193.1 209.1 222.6 222.6 236.1 236.1 236.1				
EC 45, 250 W 162		HEDL 9140	247			208.7 224.7 238.2 238.2 251.7 251.7 251.7				
EC 45, 250 W 162		Res 26	247			193.1 209.1 222.6 222.6 236.1 236.1 236.1				
EC 45, 250 W 162				AB 28	280	200.5 216.5 230.0 230.0 243.5 243.5 243.5				
EC 45, 250 W 162		HEDL 9140	247	AB 28	280	217.5 233.5 247.0 247.0 260.5 260.5 260.5				

Caractéristiques du réducteur HFUC142AR :

Schéma CAO



Photo

**Rating Table HFUC-2UH Series**

Gear Size	Ratio	Precision Gear			Output Bearing		
		Nominal Output Torque	Limit for Repeated Peak Torque of gear	Limit for Momentary Peak Torque	Permissible Dynamic Tilting Moment	Permissible Dynamic Axial Load	Permissible Dynamic Radial Load
		[Nm]	[Nm]	[Nm]	[Nm]	[N]	[N]
14	30	4	9	17	41	3374	2256
	50	5.4	18	35	41	3374	2256
	80	7.8	23	47	41	3374	2256
	100	7.8	28	54	41	3374	2256
17	30	8.8	16	30	64	3207	2148
	50	16	34	70	64	3207	2148
	80	22	43	87	64	3207	2148
	100	24	54	110	64	3207	2148
20	120	24	54	86	64	3207	2148
	30	15	27	50	91	3511	2354
	50	25	56	98	91	3511	2354
	80	34	74	127	91	3511	2354
	100	40	82	147	91	3511	2354
	120	40	87	147	91	3511	2354
	160	40	92	147	91	3511	2354