

# Tondeuse à gazon électrique



<b>Rappel du sujet</b>	<b>2</b>
<b>Calcul mécanique</b>	<b>3</b>
Valeurs remarquables	3
Calcul des efforts	3
Calcul des puissances à vitesse constante	4
Calcul du couple à vitesse constante	5
Calcul des puissances en accélération	6
<b>Composants</b>	<b>7</b>
Moteur	7
Réduction	8
<b>Choix du réglage de la vitesse</b>	<b>8</b>
Convertisseur Électronique de Puissance	10
Batterie	10
Limitations	11
Seconde Itération	11
<b>Rappel des composants</b>	<b>13</b>

## Rappel du sujet

Notre étude porte sur une tondeuse à gazon électrique sans fil prévu pour des jardins de 1000m<sup>2</sup>.

Elle sera auto-tractée et devra rester manipulable et suffisamment silencieuse.

Le produit est dans la gamme haute des tondeuses, nous pourrons donc nous permettre d'y installer des technologies du même niveau.

Nous avons relevé que la vitesse d'avance des tondeuses du commerce pouvait aller de 2 km/h à 5 km/h (soit la vitesse moyenne de marche d'un être humain), et qu'elle était soit fixe soit réglable.

**Pour notre étude, nous considérerons dans un premier temps que notre tondeuse aura une vitesse réglable à 2, 3, 4 ou 5 km/h, nous ferons donc tous nos calculs pour ces différentes valeurs de vitesse.**

Après une première itération, nous modifierons éventuellement son fonctionnement.

## Calcul mécanique

### Valeurs remarquables

Coefficient frottement	0,3
Coeff de roulement	$\approx 0,2$
Vitesse lame	3000 tr/min
Diamètre des roues	0,2 m
Poids lame	0,8 kg
Dim lame	43,7*5*4
Masse surfacique lame	36kg/m <sup>2</sup>
Inertie lame	1,27*10 <sup>-2</sup> kg.m <sup>2</sup>
Objectif de poids	35kg

Au vue des rapports de réductions nécessaires pour actionner les roues avec un moteur tournant à la même vitesse que la lame (de 200 à 500 selon la vitesse de la tondeuse), nous restreindrons nos choix de moteur pour avoir une vitesse nominale de 1500 tr/min.

### Calcul des efforts

Pour les calculs mécaniques, on négligera la force de traction de l'utilisateur qui est très inférieure à la force de traction moteur.

Nous allons d'abord commencer par appliquer le Principe Fondamental de la statique pour déterminer la pente maximale pour laquelle la tondeuse pourra se maintenir, puis la puissance minimale à fournir pour maintenir la tondeuse en fonctionnement à vitesse constante.

Les forces d'oppositions sont le poids (en pente), la force de roulement et la force d'arrachement sera négligée (poids faible):

Pente (m/m)	Forces d'opposition (N) à à vitesse constante	Validité	Condition de non-glissement : force max appliquée à la roue
0	68,67	<	120,1725
0,05	85,73040389	<	120,0225654
0,1	102,4938058	<	119,5761067
0,15	118,8429539	=	119,1

On trouve donc que la tondeuse peut avancer à vitesse constante jusqu'à des pentes de 15%, mais que les forces d'opposition sont quasiment égales à la condition de non-glissement : il y aura donc impossibilité d'accélérer lorsqu'on est en pente de 15%.

Nous allons donc considérer que le démarrage de notre tondeuse sera possible jusqu'à une pente de 10% maximum. La somme des forces appliquées à la roue en accélération sera fixée à une valeur de 114 N (fixée arbitrairement en dessous de 119 N), pour éviter le glissement de la tondeuse il ne faudra donc pas dépasser cette valeur.

Nous avons trouvé 102,5 N comme force d'opposition à une pente de 10% dans le tableau précédent, la force d'accélération de la roue sera considérée égale à **11,5 N** (114-102,5) pour rester dans le domaine d'adhérence.

Force d'accélération (N)	11,50619422	Vitesse tondeuse (km/h)	2	3	4	5
accélération max (m/s <sup>2</sup> )	0,3287484064	Temps d'accélération (à 10%) (s)	1,689911023	2,534866534	3,379822045	4,224777556

La lame devra atteindre sa vitesse maximum (soit 3000 tours/min) pendant ce temps d'accélération. On en déduit le couple d'accélération de la lame selon le réglage de vitesse :

<b>Vitesse tondeuse (km/h)</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>Cmax lame accel (Nm)</b>	<b>2,36708852</b>	<b>1,578059014</b>	<b>1,18354426</b>	<b>0,9468354081</b>

## Calcul des puissances et de couple à vitesse constante

Nous allons maintenant déterminer la puissance nécessaire pour la traction de la tondeuse à vitesse constante.

Puissance de traction (W)	Vitesse (km/h) V			
Pente	2	3	4	5
0	38,15	57,225	76,3	95,375
0,05	47,62800216	71,44200324	95,25600432	119,0700054
0,1	56,94100321	85,41150481	113,8820064	142,352508

0,15	66,02386326	99,0357948 9	132,0477265	165,0596581
------	-------------	-----------------	-------------	-------------

Nous allons ensuite déterminer la puissance de coupe. **Après contact avec un constructeur de tondeuse, on trouve des valeurs de couple de coupe de 6 Nm pour des tondeuses thermiques équipées de lame de 43cm, nous considérerons cette même valeur pour notre tondeuse électrique.**

Cette valeur sera donc multipliée par la vitesse de rotation des lames de 3000 tours/min soit 314 rad/s. Ce qui nous donne :

Puissance de coupe (W)	1884,955592
------------------------	-------------

En additionnant les deux puissances trouvées précédemment, on trouve comme puissance totale en fonctionnement :

Puissance cumulée en fonctionnement (W)	Vitesse (km/h) V = constante			
Pente	2	3	4	5
0	1923,105592	1942,18059	1961,255592	1980,330592
0,05	1932,583594	1956,39759	1980,211596	2004,025598
0,1	1941,896595	1970,36707	1998,837599	2027,3081
0,15	1950,979455	1983,99138	2017,003319	2050,01525

Nous avons ensuite déterminé le couple total en fonctionnement (toujours à vitesse constante) :

Couple cumulé	Vitesse (km/h) constante			
Pente	2	3	4	5
0	12,12143522	12,18215283	12,24287044	12,30358805
0,05	12,15160464	12,22740696	12,30320928	12,3790116
0,1	12,18124884	12,27187326	12,36249769	12,45312211
0,15	12,21016048	12,31524073	12,42032097	12,52540121

## Calcul des puissances et du couple en accélération

Nous allons maintenant déterminer les puissances et couples totaux à fournir cette fois lorsque la tondeuse est en accélération constante.

Pour la puissance de traction, elle est donc maintenant égale à la différence entre la puissance des forces d'opposition en accélération (fixée à 114 N comme expliqué plus haut) et la puissance de traction à vitesse constante déterminée plus haut. On obtient une puissance de traction maximum en accélération (à 10 % de pente) de :

	Vitesse réglée (km/h) acc = cte			
Pente de 10% (max)	2	3	4	5
Puissance de traction (accel)	6,392330124	9,588495185	12,78466025	15,98082531

De même pour la puissance de rotation de la lame : on reprend le couple d'accélération calculé plus haut qu'on multiplie par la vitesse de rotation de la lame :

Puissance rotation lame (accel) ( à pente de 10%)	743,6427906	495,7618604	371,8213953	297,4571162
Vitesse réglée (km/h)	2	3	4	5

Nous obtenons finalement une puissance totale maximale en accélération de 2350 W pour une vitesse finale de 5 km/h. On utilisera cette puissance comme base de notre couple maximale car sinon, la condition de non glissement ne pourra être remplie sans brider le moteur.

## Composants

### Moteur

Le moteur à courant alternatif monophasé est le plus intéressant dans notre cas car : on veut conserver un prix faible, la vitesse et le couple seront constants, les variations de charges seront faibles et ils ont une bonne durée de vie. Il sera asynchrone car le fonctionnement sur batterie implique une diminution de tension progressive, et donc de la vitesse de rotation avec un moteur synchrone.

En première itération, la transmission aura un rendement de 0,9.

Notre moteur idéal aurait :

Pn	Cn	Cmax	Nn
2250W	13,9Nm	16,6Nm	1500tr/min

Ashley Power TPC 100L1-4

[http://www.ashleypower.co.uk/pdf/Catalogues/Single\\_Phase\\_Electric\\_Motors\\_PC.pdf](http://www.ashleypower.co.uk/pdf/Catalogues/Single_Phase_Electric_Motors_PC.pdf)

Puissance	Couple	Courant	Nmoteur	Rendement	Cos( $\varphi$ )
2.2kW	15.11Nm	12,6A	1390tr/min = 145 rad/s	78%	0.97

Couple démarrage	Couple max	Courant démarrage	Niveau sonore	Poids
10.58Nm	27.2Nm	32A	78dB	17.5kg

Nous ne trouvons pas d'inertie pour ce moteur en particulier, mais des moteurs équivalents ont des inerties de 0,003kg/m³, nous retiendrons donc cette valeur.



## Réduction

- A partir de la vitesse de rotation du moteur choisi (145 rad/s), on peut obtenir facilement le rapport de réduction nécessaire entre la lame et le moteur : on trouve 0,463 entre la vitesse du moteur et la vitesse de rotation des lames.
- On peut aussi déterminer le rapport de réduction global entre la vitesse de rotation du moteur et la vitesse d'avance de la tondeuse :

Vitesse	2	3	4	5
Rg	262,0088273	174,6725515	131,0044137	104,8035309

- Nos roues seront des éléments standards de diamètre 200 mm, pesant chacune 400g. Le rapport de réduction intermédiaire entre le moteur et les roues (le rapport de transmission) sera donc de :

Vitesse	2	3	4	5
Rt	26,20088273	17,46725515	13,10044137	10,48035309

La réduction moteur - roue est importante, on passera donc par plusieurs étages.

## Choix du réglage de la vitesse

Face à l'absence de solution légère et ayant un bon rendement nous permettant d'avoir une vitesse réglable sur cette plage de valeur, nous avons choisi de nous rabattre sur une vitesse fixe de 5km/h pour notre modèle de tondeuse.

Il faut une réduction de 10 entre le moteur et la roue.

- Réduction roue

Afin de faire la réduction de 10, nous passerons par deux étages de roue dentée d'une réduction de 5 chacun.

Avec les méthodes de calculs de HPC, on trouve qu'avec :

- un module de 0,8
- $Z_e=10$  et  $Z_s=50$
- Acier 35NCD6

Le couple admissible sur la roue menante du second étage est de 20Nm pour 5,5Nm dans notre cas.

- Réduction lame

Pour la réduction de la lame de 0,46, on peut prendre des engrenages :

- un module de 1
- $Z_e=26$  et  $Z_s=12$
- Acier 35NCD6

Le couple admissible sur la roue menante est de 24Nm pour 15Nm dans notre application.

Avec ces nouvelles valeurs et en considérant que les engrenages ont un rendement de 0,95, nous avons besoin d'un moteur de puissance nominale 2116W minimum et un couple max de 17,2Nm si on ajoute les inerties des divers composants.

Notre moteur suffira donc puisqu'il est dimensionné à 2200W et peut développer un couple maximum de 27,2Nm.

Ces éléments ajoutent au moins 400g à l'ensemble.

## Convertisseur Électronique de Puissance

On souhaite convertir la tension continue d'entrée de la batterie en tension alternative monophasée de sortie pour le moteur asynchrone. **On va donc utiliser un convertisseur DC-AC ou onduleur.** Il existe de nombreux types d'onduleurs et nous avons cherché celui qui serait le moins encombrant possible.

La puissance moyenne consommée par le moteur déterminée est de 2700 W. L'onduleur choisi devra avoir un poids et un coût les plus bas possibles compte tenu du cahier des charges.

Nous avons choisi un onduleur dont les caractéristiques sont les suivantes :

<http://novaelectric.com/pdf/CGL-Series-3KW.pdf> (celui retenu)

Marque et modèle	Puissance de sortie	Tension d'entrée-sortie	Rendement	Poids	Niveau sonore
Nova Electric CGL3K SERIES PURE SINEWAVE INVERTER	3000 W	48V - 220V	94%	9,9 kg	NC

Avec ce CEP, la **puissance électrique consommée sera de 2886W.**

## Batterie

Pour tondre une surface de 1000m<sup>2</sup> en considérant que cette surface est couverte en ligne droite à 5km/h par la coupe de 43cm, il faudrait 28 minutes.

On se donnera un objectif de 35 minutes.

En comptant les différents rendements, la capacité de **notre batterie de 48V doit être d'au moins 35Ah.**

Afin de conserver une recharge rapide, une bonne durée de vie et un poids assez faible, nous choisirons des batteries Lithium Ion.

Il faut 14 cellules en séries pour obtenir la tension nécessaire.

En prenant des cellules de bonne qualités (400kJ/kg), on trouve un poids de 15kg.

## Limitations

Notre sujet nous a mis face à quelques limitations:

- **Le moteur et le CEP sont des éléments dédiés de base à des installations fixes et non embarquées.** Ceux qui pourraient être fabriqués pour une tondeuse seraient sans doute plus léger.
- La valeur de couple de tonte qui prend une grande partie de la puissance est une valeur trouvée pour des modèles thermiques et pouvant s'avérer supérieur à la valeur moyenne nécessaire. En effet, nous trouvons facilement des modèles de tondeuse ayant des batteries bien plus petites (36v 5Ah pour un modèle 1600W) et dont l'autonomie est pourtant équivalente voire supérieure au nôtre.

Nous réalisons tout de même une seconde itération pour déterminer si nos composants sont suffisants.

## Seconde Itération

Avec l'ensemble des composants, la tondeuse pèse déjà près de 45kg. Si on rajoute le carter, le bac à herbe et divers autres éléments, nous devrions atteindre les 50kg.

C'est plus que le poids moyen du marché mais compte tenu de la puissance du moteur et des performances de la tondeuse, on choisit de perdre un peu praticité pour l'utilisateur et d'augmenter le poids de notre tondeuse pour le dimensionnement.

Avec ce poids, nos forces d'opposition augmentent, mais c'est aussi le cas de la puissance de traction transmissible par adhérence.

Pente (m/m)	Force opposition (N) $v=ct$	Validité	Condition de non-glissement : Force à la roue max
0	98,1	<	171,7
0,05	122,4720056	<	171,5
0,1	146,4197225	<	171
0,15	169,7756484	=	170,4

Afin de conserver une accélération raisonnable, nous pouvons allouer 20N à l'accélération ce qui nous donne

Faccel (N)	20	Vitesse réglée à (km/h)	5
accel max (m/s <sup>2</sup> )	0,4	Temps d'accel (s)	3,472222222
		Cmax lame accel (Nm)	1,152048667

En acceptant de diminuer légèrement le couple de tonte à 5.7Nm (au lieu de 6 Nm), on obtient une **puissance nominale moteur de 2110W** et un **couple moteur maximum de 17.1Nm**.

Une baisse de ce couple aura un impact si la pelouse a été laissée trop longtemps sans coupe ou certaines zones sont gravillonneuses.

**Conclusion : L'ensemble des éléments restent correctement dimensionnés.**

**Il est à noter qu'en conservant un couple de tonte de 6Nm, notre moteur et notre CEP étaient légèrement sous dimensionnés (une dizaine de watt au dessus des valeurs nominales).**

## Rappel des composants

- Moteur Ashley Power TPC 100L1-4  
[http://www.ashleypower.co.uk/pdf/Catalogues/Single\\_Phase\\_Electric\\_Motors\\_PC.pdf](http://www.ashleypower.co.uk/pdf/Catalogues/Single_Phase_Electric_Motors_PC.pdf)

Puissance	Couple - Couple max	Nmoteur	Rendement	Poids
2.2kW	15.11Nm - 27.2Nm	1390tr/min	78%	17.5kg

- Onduleur Nova Electric CGL3K SERIES PURE SINEWAVE INVERTER :  
<http://novaelectric.com/pdf/CGL-Series-3KW.pdf> (celui retenu)

Puissance de sortie	Tension entrée-sortie	Rendement	Poids
3000 W	48V - 220V	94%	9,9 kg

<u>Réduction roue</u> Roue arrière de 200mm Réduction de 10 par engrenage <ul style="list-style-type: none"> <li>• Module de 0,8</li> <li>• Ze=10 et Zs=50</li> <li>• Acier 35NCD6</li> </ul>	<u>Réduction lame</u> Réduction de 0.46 par engrenage <ul style="list-style-type: none"> <li>• Module 1</li> <li>• Ze=26 et Zs=12</li> <li>• Acier 35NCD6</li> </ul>
---	---

- Batterie Li-ion 48V 35Ah

Poids total du système : 50kg

**Note : Nous n'avons pas pu déterminer le prix approximatif de ce prototype puisque le prix du CEP et du moteur n'étaient pas trouvables.**