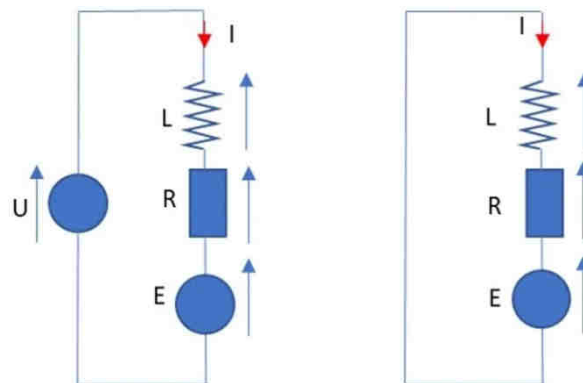


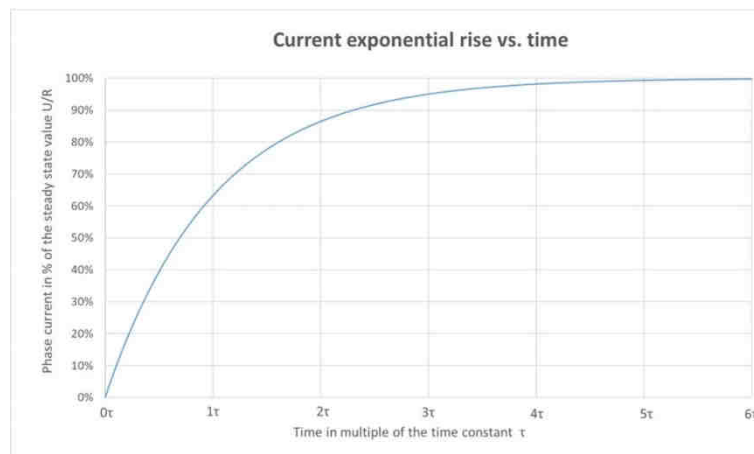
J'ai cherché le pourquoi de l'échauffement des moteurs avec une alimentation PWM, en voici un résumé.

Un moteur à courant continu est caractérisé par une inductance  $L$ , une résistance  $R$  et une force contre-électromotrice  $E$  (C-FEM) en série. La C-FEM est une tension provoquée par l'induction magnétique (loi d'induction de Faraday-Lenz) qui s'oppose à la tension appliquée et est proportionnelle à la vitesse du moteur. Voir la figure suivante, montrant le moteur lorsque le PWM est activé (à gauche) et lorsque le PWM est désactivé (à droite).

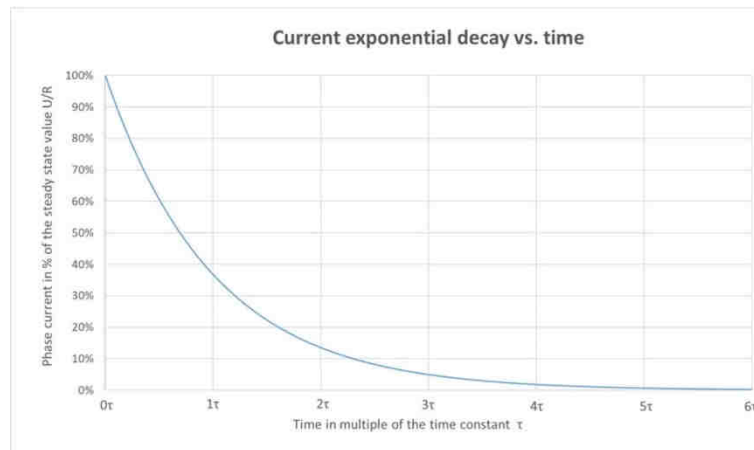


Pour simplifier les choses, nous ne considérerons pas la F-CEM.

Lors de l'application d'une tension ou d'une coupure de tension à un circuit RL, l'inductance s'opposera au changement de courant. En appliquant une tension  $U$  au circuit RL, le courant suivra une montée exponentielle, dont la dynamique dépend de la constante de temps. Elle atteindra la valeur maximum après 5 fois la constante de temps.



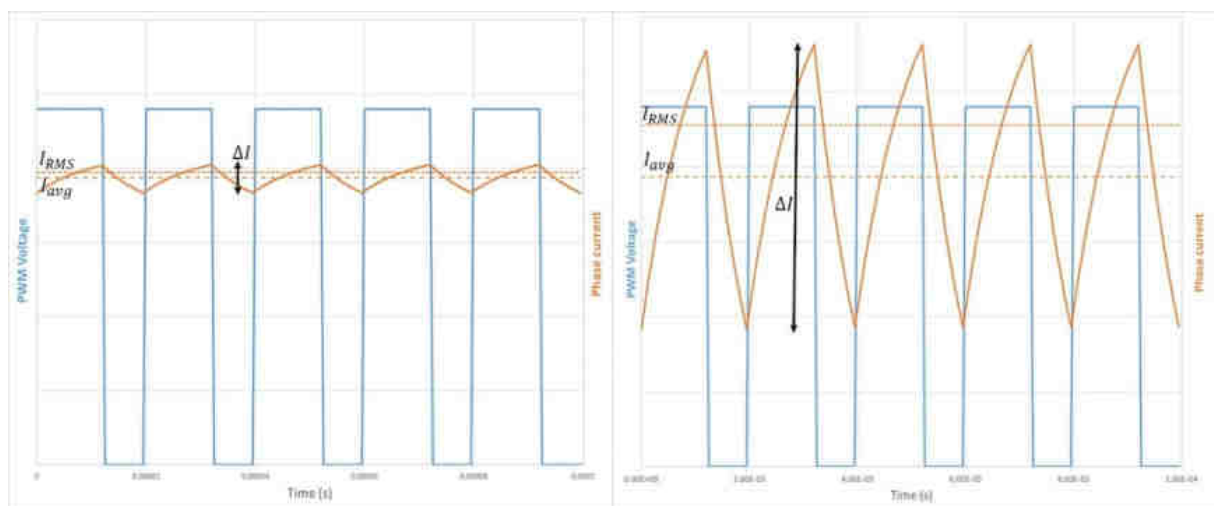
Le même comportement exponentiel sera observé lorsque le circuit RL se déchargera.



Les moteurs à courant continu ont une constante de temps électrique de quelques centaines de microsecondes. Par contre, la constante de temps mécanique est de l'ordre de quelques millisecondes, il y a donc un facteur 10 entre la constante de temps mécanique et la constante de temps électrique. Par conséquent, le rotor du moteur engendrera une inertie importante lorsque la tension est commutée à des fréquences PWM faibles.

Les conséquences sont que chaque cycle PWM entraînera une augmentation et une diminution du courant. La variation entre la valeur minimale et la valeur maximale du courant est appelée l'ondulation du courant  $\Delta I$ . Comme nous allons le voir ci-dessous, un courant élevé d'ondulation peut être problématique, il est donc conseillé de le maintenir le plus bas possible.

On peut voir dans la figure ci-dessous la différence du courant d'ondulation entre une fréquence élevée (à gauche) et une fréquence basse (à droite). À fréquence élevée la valeur du courant d'ondulation ( $I_{RMS}$ ) est proche du courant moyen ( $I_{avg}$ ), alors qu'il est beaucoup plus élevé à fréquence basse.



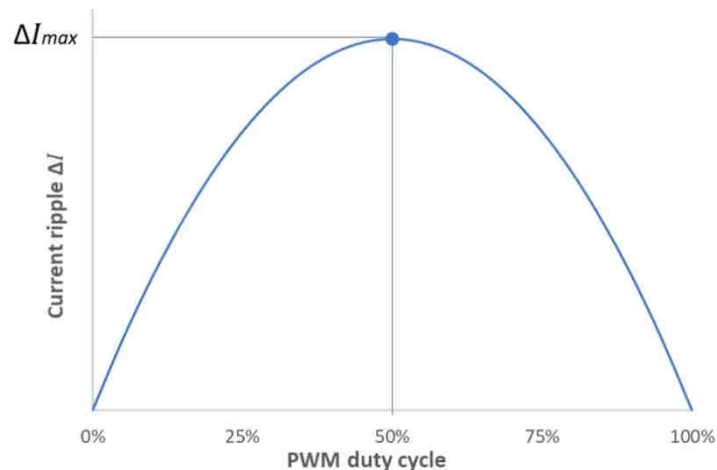
**L'ondulation va générer deux types de pertes :**

1. **Pertes Joules** : Le courant d'ondulation augmentera la valeur du courant RMS, qui est la valeur considérée pour le calcul des pertes Joules. L'ondulation va générer un échauffement supplémentaire, sans augmenter le courant moyen, donc sans augmenter le couple.

2. **Pertes de fer** : Selon la loi de Faraday sur l'induction électromagnétique, la variation du champ magnétique dans un matériau conducteur va induire une tension, qui va alors générer des courants de circulation appelés courants de Foucault.

Les pertes par courants de Foucault sont proportionnelles au carré de la vitesse du moteur et au carré du courant du moteur. D'après des mesures pratiques, lorsque le courant d'ondulation est élevé, les pertes fer supplémentaires générées peuvent devenir importantes.

La variation du courant d'ondulation en fonction du rapport cyclique PWM est une parabole, comme le montre la figure ci-dessous.



**Les recommandations pour minimiser l'ondulation :**

1. **Réduire ou adapter la tension d'alimentation** : L'ondulation de courant est proportionnelle à la tension d'alimentation. Le fonctionnement sous le même point de charge avec une tension d'alimentation plus faible augmentera également le rapport cyclique, ce qui réduira encore plus l'ondulation du courant. Il est important de maintenir le rapport cyclique du PWM aussi loin que possible de 50%, ce qui est le pire des cas.
2. **Augmenter la fréquence PWM** : Une fréquence plus élevée entraînera un temps de cycle plus court du PWM, le courant aura donc moins de temps pour monter.