

# La distribution Walschaerts

## Et le cheval devint vapeur...

*Par Charles Sol pour @eduMediaTweets nov. 2014*



La locomotive à vapeur est depuis longtemps dans nos musées. Ce fut pourtant une application majeure de notre civilisation moderne. Cet objet technique nous emmène vers de nombreux projets pédagogiques en :

1. Histoire : la révolution industrielle.
2. Mathématiques : le déphasage et la fonction sinusoïdale.
3. Technologie :
  - Les machines simples (la roue, le mouvement bielle manivelle).
  - La transmission du mouvement : Comment transformer une translation en une rotation puis une rotation en translation ?
  - Roue motrice / roue entraînée. Liaisons (pivot, coulissage), degrés de liberté.
4. Physique : Énergie avec la conversion énergie thermique → énergie mécanique, thermodynamique.
5. Chimie : Combustion du charbon.

Seules quelques idées de projets seront détaillées ici autour de la **distribution Walschaerts** qui fut une des grandes innovations techniques du XVIII<sup>e</sup> siècle.

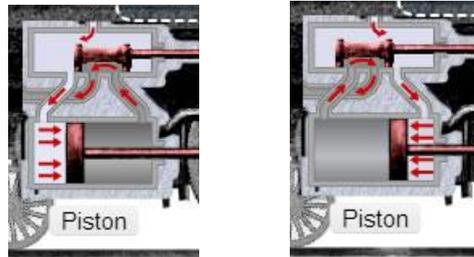
Le contexte historique de cette invention (1845) est la révolution industrielle, la machine à vapeur étant un symbole important de cette période. La puissance motrice de la vapeur surchauffée est connue depuis les machines de Papin (1690), Newcomen (1710) et Watt (1769). Pour la première fois depuis des millénaires, une machine est envisagée pour remplacer la force animale.

Les premiers véhicules à vapeur apparaissent (bateau, locomotive), mais dompter cette énergie n'est pas simple. Le principe de fonctionnement de la locomotive à vapeur repose grandement sur ce mécanisme d'entraînement inventé par l'ingénieur Belge Égide Walschaerts.

Tout comme la machine de James Watt, l'idée repose sur un piston double effet, où la vapeur est distribuée alternativement de part et d'autre du piston. Ceci permet d'accroître

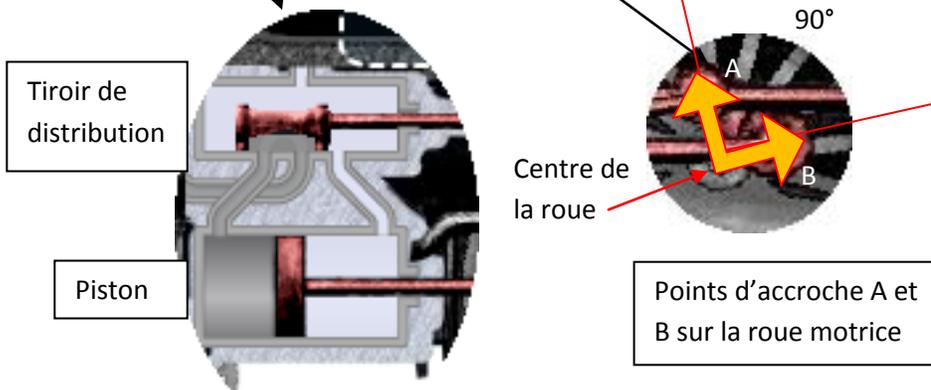
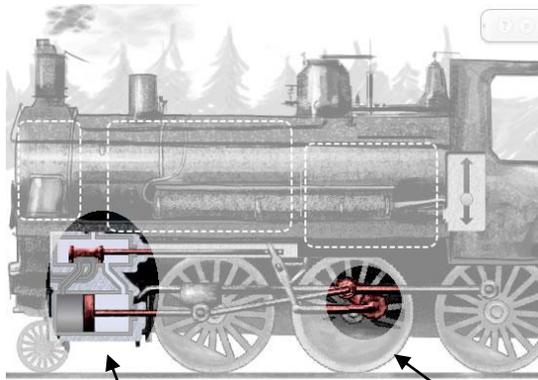
notablement le rendement de la machine avec une force motrice appliquée en permanence sur le piston (à l'aller comme au retour). Le dispositif mécanique de la distribution Walschaerts s'avère plus robuste et contrôlable pour de forte puissance. Le boom ferroviaire lui doit beaucoup.

Principe du piston double effet



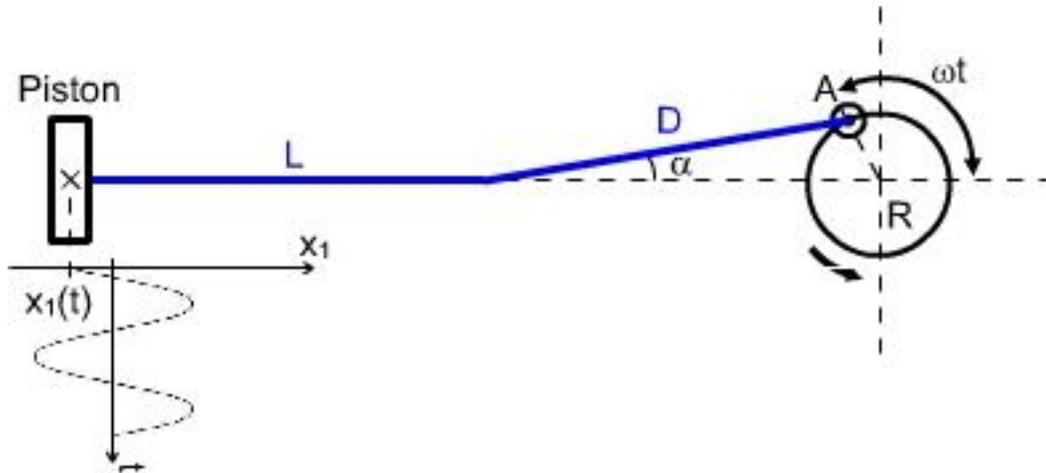
L'animation eduMedia « [locomotive](http://www.edumedia-sciences.com/fr/a884-locomotive-a-vapeur) » illustre le principe d'un déphasage entre le piston et le tiroir glissant :

<http://www.edumedia-sciences.com/fr/a884-locomotive-a-vapeur>

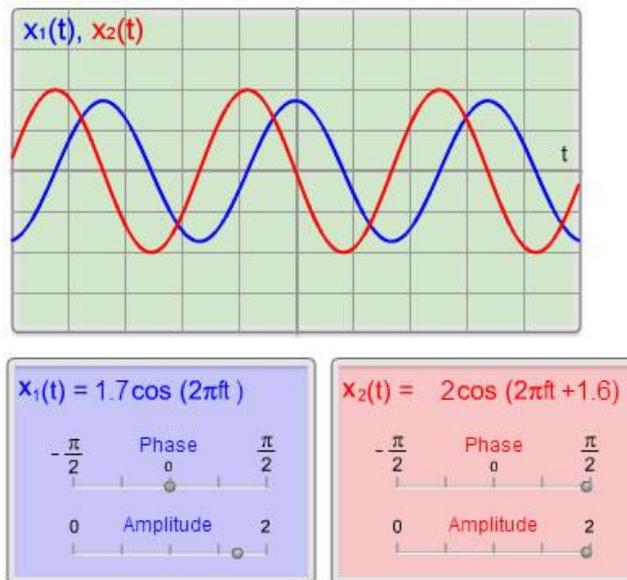


**Mathématiques** : La fonction sinusoïdale et le déphasage.

Les déplacements  $x_1(t)$  et  $x_2(t)$  du piston et du tiroir sont des mouvements périodiques. Le fonctionnement du tiroir impose qu'il oscille rigoureusement à la même fréquence/pulsation que  $x_1(t)$  mais avec un déphasage de  $90^\circ$  ( $\pi/2$ ). Pour simplifier, nous approximerons  $x_1(t)$  et  $x_2(t)$  à des fonctions sinusoïdales. La figure ci-dessous montre que la courbe  $x_1(t)$  du mouvement du piston peut effectivement s'exprimer sous la forme d'une fonction sinusoïdale si l'angle  $\alpha$  est petit :  $x_1 = x_{1\max} \cdot \cos(\omega t + \phi)$ . Il faut pour cela écrire l'équation du mouvement en la projetant sur l'axe horizontal  $x_1$ .



Voici l'allure des deux courbes illustrant ce déphasage. Cette figure est réalisée avec l'animation « [phaseurs](http://www.edumedia-sciences.com/fr/a577-phaseurs) » d'eduMedia : <http://www.edumedia-sciences.com/fr/a577-phaseurs>



Cette animation permet d'illustrer les paramètres principaux de la fonction sinusoïdale.

Comment obtenir ce déphasage ?  $x_1(t)$  et  $x_2(t)$  sont en quadrature si les points d'accroche A et B sont sur la même roue et font un angle de  $90^\circ$  l'un par rapport à l'autre. L'étude de la projection

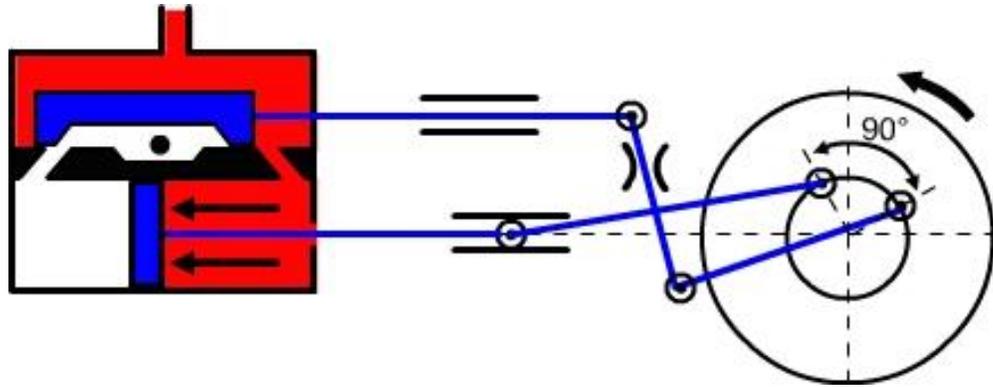
selon X des points A et des oints B illustre bien. L'animation « [cercle trigonométrique](#) » d'eduMedia est aussi là pour vous aider.

### **Technologie :**

Le « génie » de ce système d'apparence simple, est multiple et il faut prendre le temps de bien l'analyser :

1. **Double action** : Déjà breveté par James Watt, le principe d'une distribution alternée permet d'avoir un couple moteur à chaque mouvement du piston, à l'aller comme au retour. Voir la [machine de Watt](http://www.edumedia-sciences.com/fr/a882-machine-a-vapeur) : <http://www.edumedia-sciences.com/fr/a882-machine-a-vapeur>
2. **Double action #2** : La distribution de Walschaerts inclut une double transmission de mouvement : Le mouvement de translation du piston se transforme en mouvement de rotation de la roue et cette même roue transforme sont mouvement de rotation en mouvement de translation du tiroir.
3. **Marche arrière** : Cela n'est pas illustré sur l'animation mais il est possible d'inverser la poussée de façon très souple en ajoutant un déphasage de  $180^\circ (\pi)$ . C'est-ce qui se passe en déplaçant astucieusement une came. Ceci est visible au début de [cette vidéo](#).  
<https://www.youtube.com/watch?v=xTXYTvjOPBc> ou sur ce [Gif animé](#) :  
[http://fr.wikipedia.org/wiki/Distribution\\_Walschaerts#mediaviewer/File:Walschaert\\_ge\\_ar\\_reversing.gif](http://fr.wikipedia.org/wiki/Distribution_Walschaerts#mediaviewer/File:Walschaert_ge_ar_reversing.gif). Cette inversion de poussée peut être déclenchée alors que la locomotive roule vers l'avant ce qui est un freinage original qui n'utilise pas de pièces mécaniques comme des patins.
4. **Démarrage** : Si le piston est arrêté à une extrémité du cylindre au moment du démarrage, il est facile de comprendre qu'on se trouve devant une incertitude concernant le sens de rotation que va adopter la roue. On peut partir vers l'avant ou vers l'arrière. C'est pour lever cette incertitude que la seconde rangée de roue (celle qui est de l'autre côté et qu'on ne voit pas sur l'animation) est, elle aussi, déphasée de  $90^\circ (\pi/2)$  par rapport au premier train de roue. De ce fait, il n'y a jamais les deux trains de roue en butée. Astucieux non ? Voici une [vidéo 3D](#) qui illustre ce déphasage :  
<https://www.youtube.com/watch?v=xTXYTvjOPBc>
5. **Asservissement** : Le mécanisme propose un contrôle d'une précision incroyable sous la forme d'un asservissement « auto-verrouillé ». Il est clair que le tiroir de distribution doit posséder rigoureusement la même pulsation  $\omega$  que le piston. C'est forcément le cas puisque l'arbre de transmission du mouvement du tiroir est commandé par la roue, elle-même commandée par le piston. Si brutalement une perturbation fait accélérer le piston (ex : la roue glisse), la correction est immédiate sur le tiroir puis qu'il est solidaire de la roue. Tiroir et piston demeurent synchronisés à tout instant.

Le schéma de principe est un dessin simplifié qui permet de décrire le fonctionnement de l'objet technique :



### **Histoire :**

Comme mentionné en introduction, la machine à vapeur remplace pour la première fois la force animale. Cette réalité n'est pas anecdotique. Il faut pour cela se convaincre que la domestication de l'animal, notamment du cheval, fut l'un des progrès qui a le plus marqué l'histoire de l'humanité. En facilitant le transport des marchandises, le travail agricole, les déplacements « rapides » des personnes, le cheval fut l'artisan de toutes les civilisations influentes du passé, sans exception.

Un cheval porte sur son dos 100kg, tracte 500 kg sur une charrue, ou même 20 tonnes quand il tire une barge sur un canal. Le cheval devient une unité de puissance, à tel point que la puissance développée par la machine à vapeur s'exprimera en « chevaux vapeur ».

Jusqu'au début du XIXe siècle, les chevaux sont absolument partout, bien entendu dans les campagnes, mais aussi dans les villes :

San Francisco 1900 : <https://www.youtube.com/watch?v=tN-HIA4H1vA>

Paris 1900 : <https://www.youtube.com/watch?v=LUIOWmTFbVY>

Il y avait en 1900 55000 chevaux dans Paris, sans compter ceux en transit (Source « [Le Cheval à Paris de 1850 à 1914](#) »).

Voir aussi [l'histoire des moyens de transports](#) d'eduMedia :



Le boom ferroviaire stimule le développement industriel par ses besoins en acier et en béton (rails, ponts, tunnels).

Cet extrait du film « [La bête humaine](#) » (1938) permet de se replonger dans cette époque pas si lointaine: <https://www.youtube.com/watch?v=xGGOKmYGBwM>

Souvenons nous aussi que l'union européenne s'est développée après la seconde guerre mondiale sous le nom de CECA (Communauté Européenne du Charbon et de l'Acier) soulignant l'importance stratégique de cette industrie.