

1. RÉGULATEURS

Les machines à vapeur industrielles étaient conçues pour fonctionner à vitesse constante et couple variable. En mécanique le couple c'est la grandeur physique qui produit le mouvement d'un axe en rotation. Sur une bicyclette la pression sur les manivelles produit un couple qui met en mouvement le pédalier. Si une côte de faible pente se présente mais que l'on veut maintenir la même vitesse qu'auparavant sur le plat, on appuiera plus fort sur les manivelles afin d'augmenter le couple moteur face au supplément de couple résistant amené par la pente.

Dans les ateliers au XIX^{ème} et début XX^{ème} siècle la transmission de puissance était réalisée par ligne d'arbre et courroie (*line shaft and belt drive*). Le moteur vapeur devait s'adapter aux variations de charge sans modifier, si possible, la vitesse de rotation des arbres menants sous peine de dérégler la marche de certaines machines.



Au premier plan en bas à droite on aperçoit le moteur qui anime l'atelier.

Sur les moteurs le contrôle de vitesse s'appuyait sur deux équipements de régulation : le volant d'inertie et le régulateur centrifuge.

- le volant d'inertie (*flywheel*) ; on peut le considérer comme un stockage d'énergie mécanique. Sur les moteurs alternatifs à piston le couple moteur est variable s'annulant en deux positions de la bielle (point mort haut et point mort bas). L'énergie emmagasinée dans le volant d'inertie permet de passer les zones à couple faible ou nul sans que l'ensemble ne cale. C'est leur fonction première. De plus le volant « lisse » les variations de charge rapide et de faible intensité. Cependant le volant d'inertie ne garantit pas une vitesse de rotation constante car lorsqu'il fournit de l'énergie sa vitesse de rotation diminue.

Ce document est la propriété de VAPEUR 45. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de VAPEUR 45



- VAPEUR 45 -

FOLIO 1/28 - Sept 2024

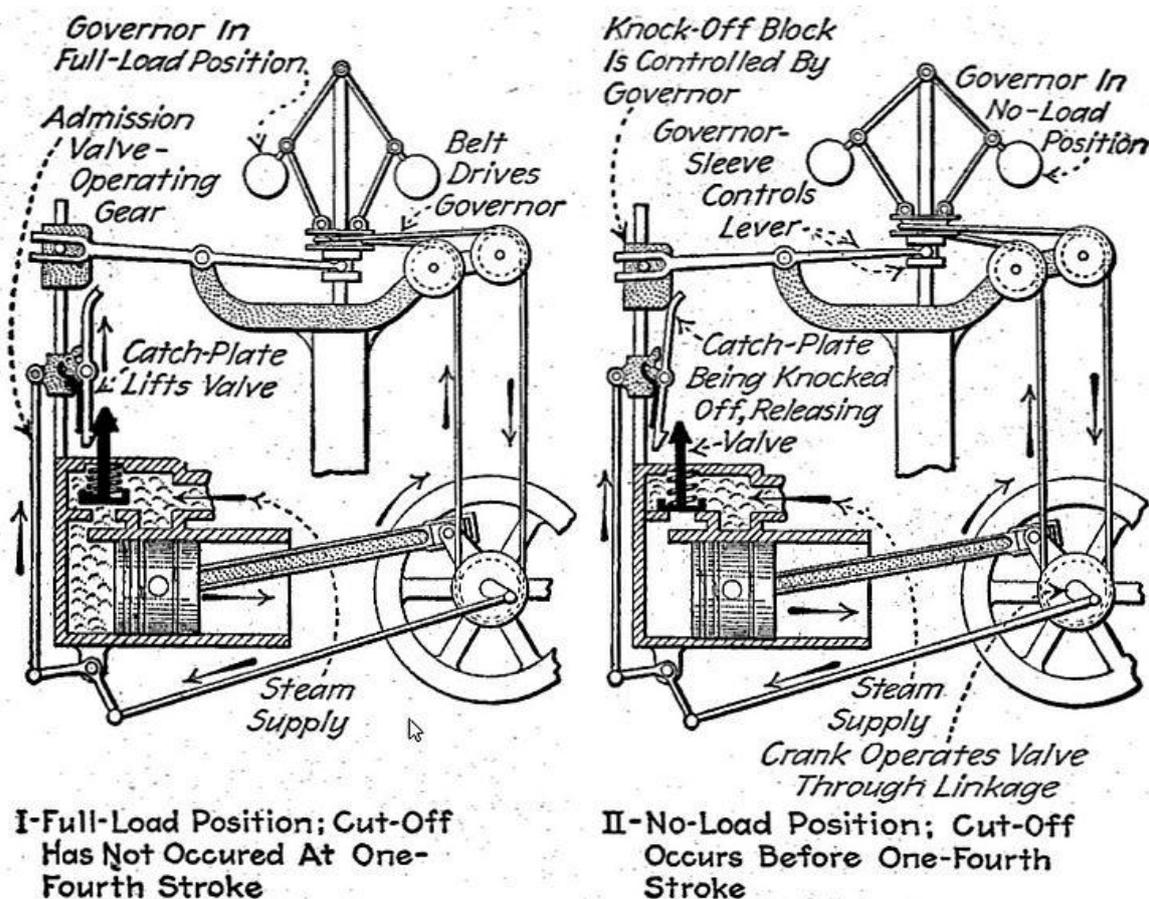
 Villeneuve d'Ascq
Une ville en mouvement

Un site régulièrement mis à jour <http://vapeur45.fr>

FICHE TECHNIQUE REGULATEUR VAPEUR

FPe41

- Le régulateur centrifuge (centrifugal governor) est conçu pour maintenir la vitesse constante sur le temps long, malgré les variations de charge sur la ligne d'arbre. Le régulateur atteint cet objectif en agissant sur l'admission de vapeur et cela de deux manières : soit par une vanne de laminage (volet ou piston) réduisant le débit de la vapeur vive ou bien en faisant varier la durée d'admission de la vapeur vive dans le cylindre. La première méthode, la plus courante, a le défaut de modifier les qualités de la vapeur à cause de la perte de charge introduite par la restriction de la section de passage dans la conduite. La seconde n'a pas ce défaut et est réputée plus précise.



On a représenté sur les schémas ci-dessus le principe de régulation par coupure d'admission (*cut-off*). Sur la figure I on est à pleine charge (*Full load*), l'admission n'est pas coupée bien qu'on ait déjà atteint le quart de la course. Sur la figure II pour la marche à vide (*No load*) la valve est fermée dès qu'on atteint le quart de la course.

Ce document est la propriété de VAPEUR 45. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de VAPEUR 45



- VAPEUR 45 -

FOLIO 2/28 - Sept 2024

Villeneuve d'Ascq
Une ville en mouvement

Un site régulièrement mis à jour <http://vapeur45.fr>

2. RÉGULATEUR CENTRIFUGE

James Watt, initialement fabricant d'instruments scientifiques, a adapté dès 1790 le régulateur centrifuge à boules (*flyball governor*) à la conduite de machines à vapeur.



Régulateur de Watt original sur machine à balancier (vers 1800).

Régulateur sur la machine Boulton-Watt à renvoi d'angle (crank bell) vers 1810. Sur cette machine le régulateur est entraîné depuis l'arbre moteur par poulie et renvoi d'engrenages.



Ce document est la propriété de **VAPEUR 45**. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de **VAPEUR 45**



- VAPEUR 45 -

FOLIO 3/28 - Sept 2024

 **Villeneuve d'Ascq**
Une ville en mouvement

Un site régulièrement mis à jour <http://vapeur45.fr>

Les masselottes sont entraînées en rotation par l'arbre central. A leur tour, par un jeu de biellettes, elles entraînent dans leur mouvement la bague coulissante (*sleeve*). Une gorge est usinée dans la bague coulissante, gorge dans laquelle s'insère un doigt suiveur à renvoi d'angle (*bell crank lever*). Un jeu de biellette et d'axes va transmettre le mouvement en direct pour commander un organe de réglage de débit de vapeur (*Throttle valve*).

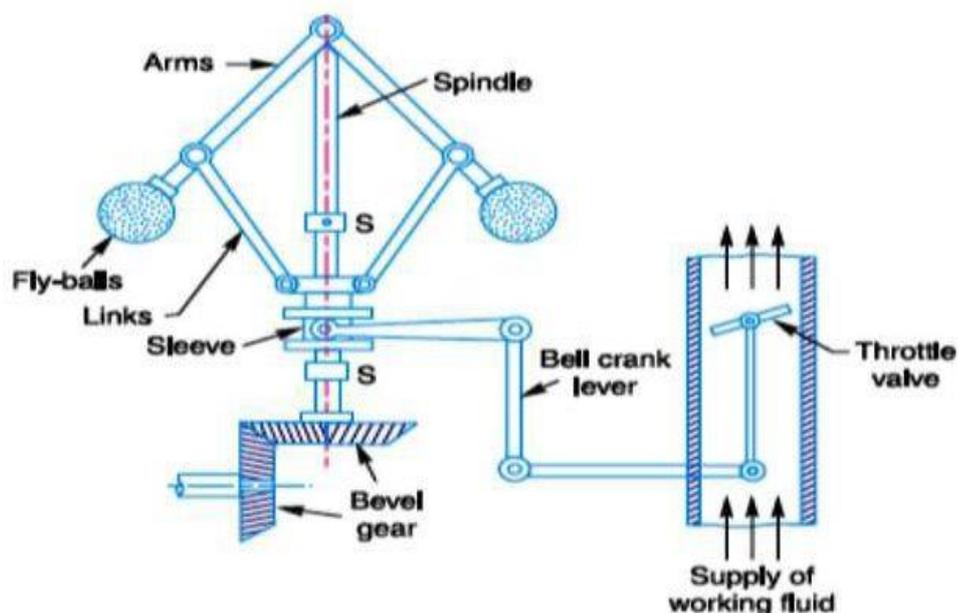
Voilà pour le principe général.

Dans sa forme originale le régulateur de Watt n'est adapté qu'aux machines lentes, typiquement pompage par pompe à clapets, avec des variations de charge progressives ou des variations de qualité de vapeur (pression/débit) modérées.

L'arrivée de la haute pression et de machines rapides vouées à d'autres tâches plus exigeantes que le pompage, comme l'entraînement de machines ou la propulsion, vont faire évoluer ce type de régulateur. L'amélioration de la réponse dynamique aux perturbations devient la préoccupation majeure. Ceci va amener des conceptions nouvelles.

On détaillera dans le chapitre suivant les régulateurs axiaux qui, bien que basés sur des principes comparables aux régulateurs à axe vertical ont amené des réponses technologiques sensiblement différentes.

Le schéma suivant détaille les principaux éléments du dispositif.



On représente souvent les régulateurs associés à la commande de vanne papillon mais les vannes à clapet ou à piston sont très présentes sur les installations industrielles.

Le régulateur de Watt représenté ci-dessous, plus tardif, dérive directement du régulateur de Watt. Le régulateur est en commande directe. Il ne dispose pas de sécurité sur la rupture de la courroie de transmission, ni de dispositif de démarrage. Pas d'amortisseur (*dash pot*) non plus, ni de mécanisme de réglage fin.

Ce document est la propriété de VAPEUR 45. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de VAPEUR 45



- VAPEUR 45 -

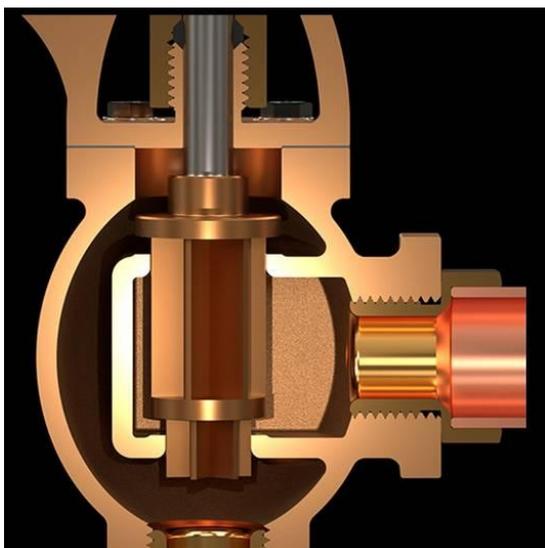
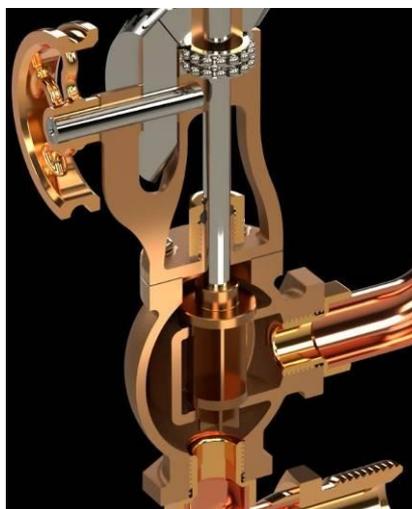
FOLIO 4/28 - Sept 2024

 Villeneuve d'Ascq
Une ville en mouvement

Un site régulièrement mis à jour <http://vapeur45.fr>



Ce modèle était vraisemblablement destiné aux moteurs de quelques dizaines de chevaux animant des ateliers de taille moyenne.



3. TYPOLOGIE DES RÉGULATEURS

On peut tracer la généalogie des principaux types de régulateurs depuis le régulateur de Watt.

Les premières modifications apparues sont les régulateurs à charge additionnelle fixe.

3.1. Régulateur Porter

Ce régulateur dérive de celui de Watt par l'addition d'une masse liée à la bague coulissante. Cette masse peut être modifiée par l'ajout ou le retrait de grenaille (shot). Cette masse exerce une force rappel indépendante de la vitesse de rotation de l'axe. On réduit ainsi les problèmes d'oscillation et d'instabilité. Sur la gravure ci-contre il s'agit d'un modèle tardif

Ce document est la propriété de VAPEUR 45. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de VAPEUR 45

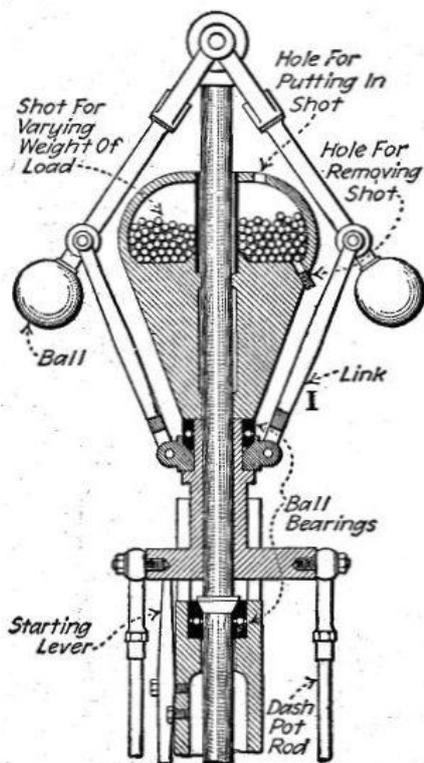


- VAPEUR 45 -

FOLI0 5/28 - Sept 2024

 Villeneuve d'Ascq
Une ville en mouvement

Un site régulièrement mis à jour <http://vapeur45.fr>



assez élaboré car il est monté sur roulement à billes (*balls bearings*). On lui a adjoint un levier pour le mode démarrage (*Starting lever*) et une tige de liaison vers un amortisseur (*Dash pot rod*), amortisseur non représenté sur la gravure.

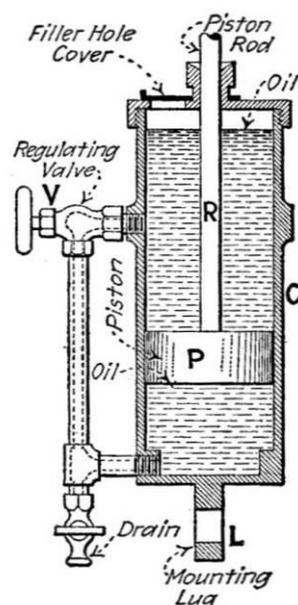
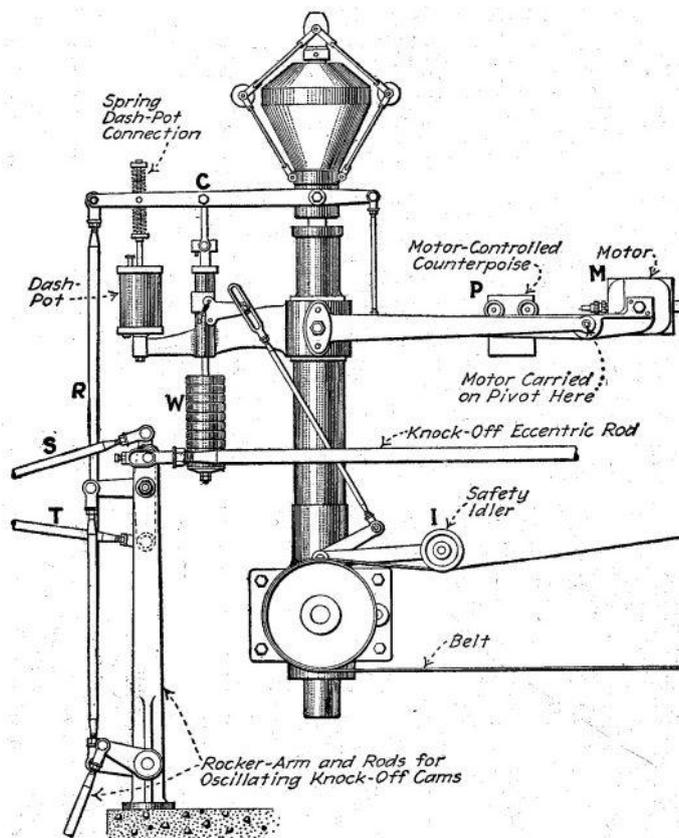


Figure de droite : Amortisseur hydraulique « dash pot ». On peut le combiner avec un ressort placé dans la cartouche

La figure ci-contre illustre un système complet pour moteur à distribution Corliss, moteur initialement mis au point pour entraîner des métiers à tisser dans des filatures industrielles. Ici le moteur était utilisé pour entraîner un générateur électrique. Il est équipé d'un amortisseur à huile (*dash pot*) combiné avec ressorts pour limiter les oscillations lors de variation de charge. Le régulateur est aussi muni d'un dispositif de sécurité en cas de rupture de la courroie (*belt*). La poulie libre à gorge (*Safety idler*) se libère sur rupture de la courroie et ôte le cliquet de maintien. Une fois le cliquet dégagé, les poids *W* entrent en action en *C* en amenant et en maintenant le doigt de commande en position d'arrêt ou de vitesse réduite. *R*, *S*, *T* sont les tiges de commande du moteur. Le moteur électrique *M* est commandé à distance par l'opérateur pour finement régler la vitesse de rotation du moteur à vapeur afin d'obtenir la synchronisation de la génératrice sur le réseau électrique. Le



Ce document est la propriété de VAPEUR 45. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de VAPEUR 45



- VAPEUR 45 -

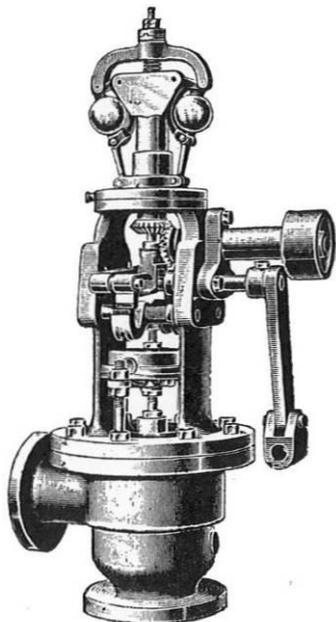
FOLIO 6/28 - Sept 2024

 Villeneuve d'Ascq
Une ville en mouvement

Un site régulièrement mis à jour <http://vapeur45.fr>

moteur **M** déplace un contrepoids **P** qui agit sur la position d'équilibre du doigt suiveur.

3.2. Régulateur Proell

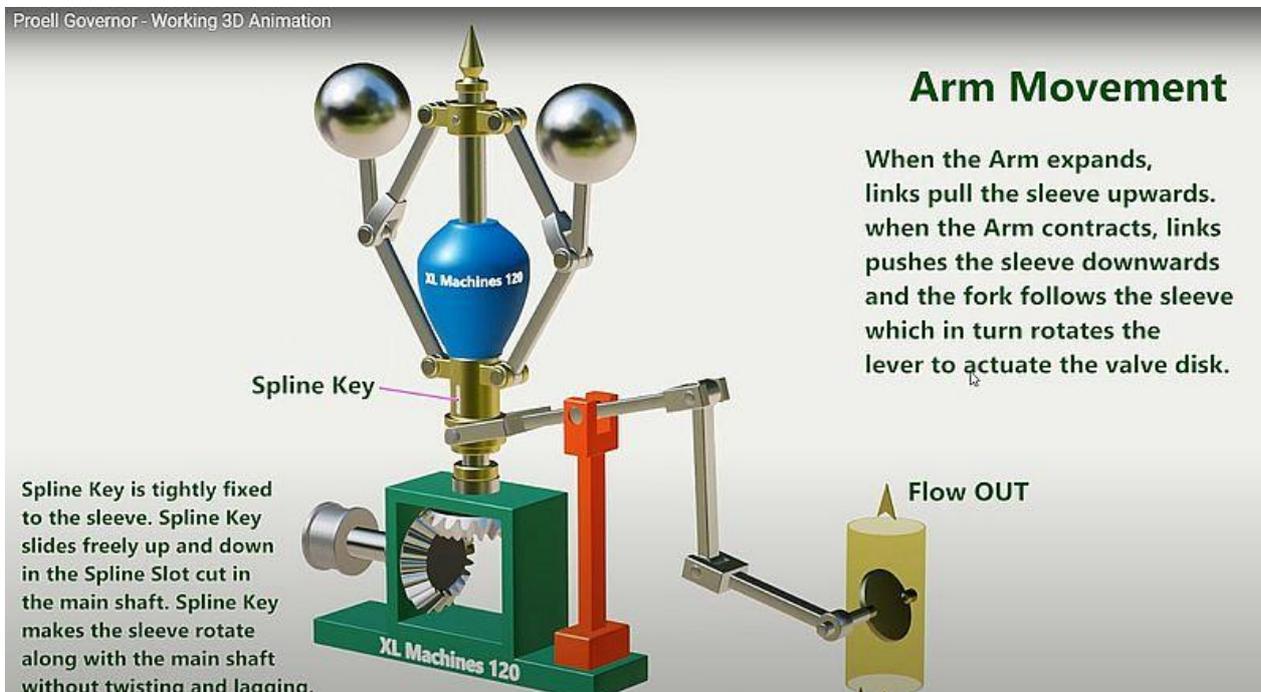


C'est un régulateur Porter mais dont les masselottes sont quasi verticales et attachées aux biellettes inférieures.

Sur la gravure le régulateur commande en direct la vanne d'admission, très certainement via un piston-clapet. La gravure ne permet pas de distinguer s'il existe des systèmes de sécurité et/ou de réglage.

La capture d'écran ci-dessous schématise le mode de fonctionnement du système de régulation.

Proell Governor - Working 3D Animation



Ce document est la propriété de **VAPEUR 45**. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de **VAPEUR 45**



- **VAPEUR 45** -

FOLI0 7/28 - Sept 2024

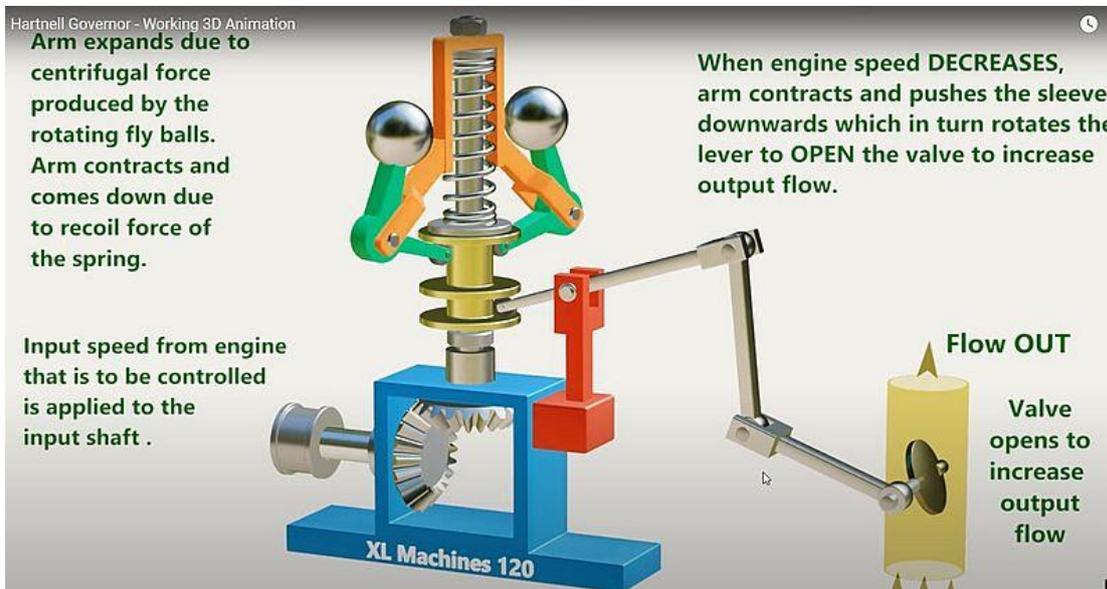
Villeneuve d'Ascq
Une ville en mouvement

Un site régulièrement mis à jour <http://vapeur45.fr>

4. RÉGULATEUR À MASSELOTES ET RESSORT

Les types principaux sont les régulateurs Hartnell, Hartung, Wilson-Hartnell, Pickering.

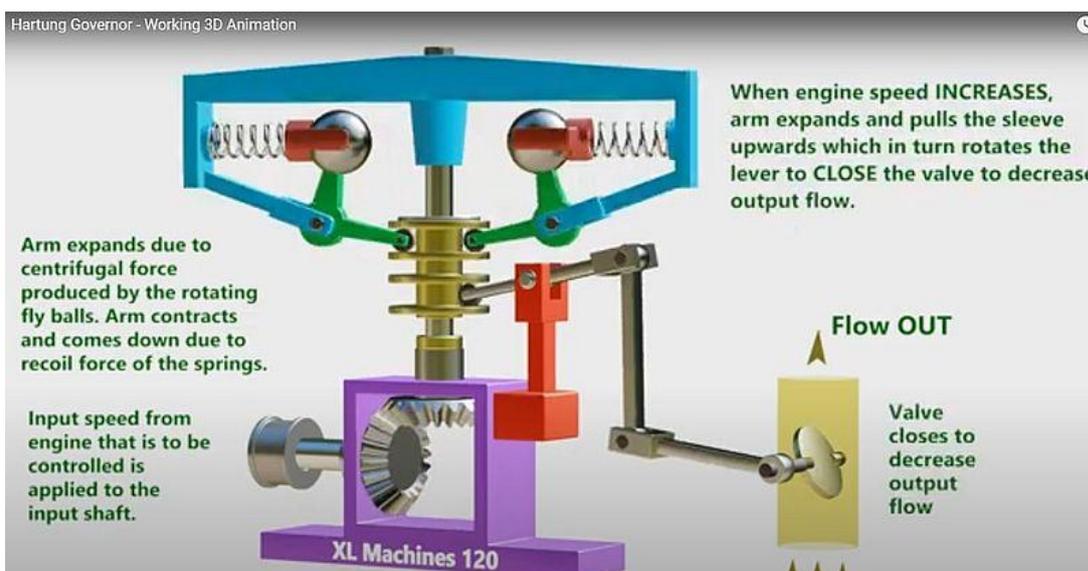
4.1. Hartnell



Le fonctionnement de ce régulateur est assez intuitif. Lorsque la vitesse s'accroît les masselottes s'écartent et la bague coulissante comprime le ressort. Le ressort exerce une force rappel sensiblement proportionnelle à l'amplitude du déplacement de la bague coulissante, déplacement induit par les barres de renvois auxquelles les masselottes sont attachées.

4.2. Hartung

Le fonctionnement est très proche du précédent.



Ce document est la propriété de VAPEUR 45. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de VAPEUR 45



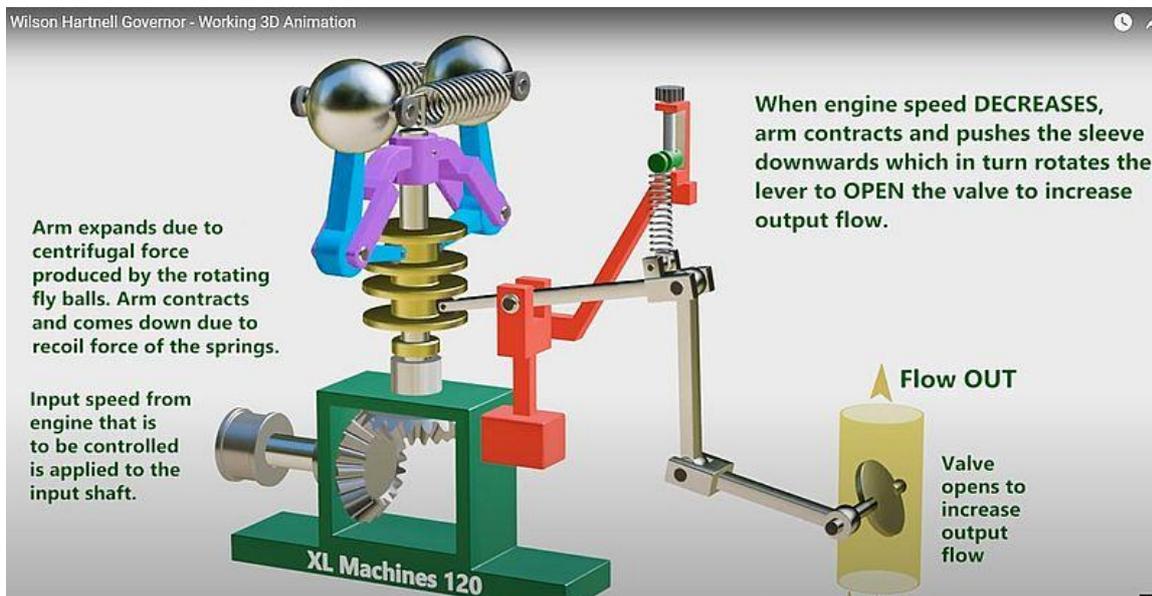
- VAPEUR 45 -

FOLIO 8/28 - Sept 2024

Villeneuve d'Ascq
Une ville en mouvement

Un site régulièrement mis à jour <http://vapeur45.fr>

4.3. Wilson-Hartnell



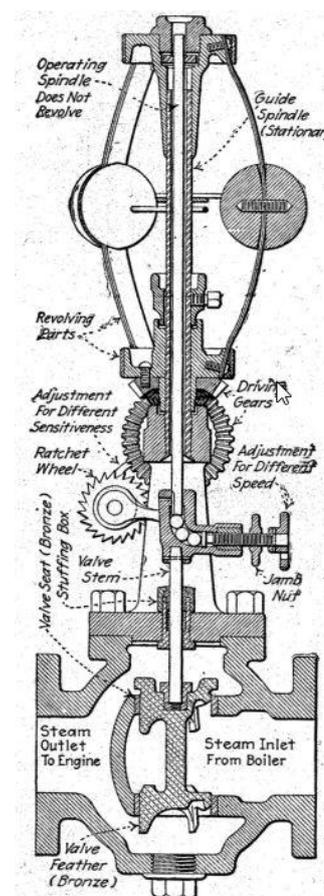
4.4. Pickering



Ce régulateur est du type à ressort en ce que les supports de masselottes sont des lames flexibles.

Sous forme miniaturisée des variantes de ces régulateurs furent utilisées dans les Gramophones.

Le régulateur en coupe agit directement sur la valve de type clapet (*Valve feather*)



Ce document est la propriété de **VAPEUR 45**. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de **VAPEUR 45**



- VAPEUR 45 -

FOLIO 9/28 - Sept 2024

 **Villeneuve d'Ascq**
Une ville en mouvement

Un site régulièrement mis à jour <http://vapeur45.fr>

5. RÉGULATEURS AXIAUX

Les régulateurs axiaux (*shaft governors*) sont logés dans le volant d'inertie. Ces régulateurs étaient largement utilisés sur les moteurs rapides et semi-rapides. Tous fonctionnent sur le principe de la coupure d'admission. Ils agissent en modifiant la position de l'excentrique de distribution. Ils conviennent aux distributions à tiroir, à soupapes, ainsi qu'à certaines distributions Corliss. Ils sont adaptés aux variations rapides de charge, et offrent une régulation précise et fiable. Comme on le verra par la suite ces régulateurs utilisent l'effet centrifuge mais aussi la composante inertielle. Ils ne peuvent pas être réglés en marche et leur capacités de réglage sont moins étendues que les régulateurs à axe vertical.

Comme ils agissent en direct sur l'excentrique, la force de commande, à machine identique, est beaucoup plus élevée que celle exercée par un régulateur de Watt pour la manœuvre du clapet. La force à exercer et la loi de régulation sont dépendantes de la technologie de distribution de vapeur (tiroir, soupape, piston). On ne peut donc pas les étudier de manière isolée comme pour le régulateur de Watt. Ces régulateurs étaient généralement spécifiquement étudiés pour chaque moteur et chaque application. Ces régulateurs régulent la vitesse à mieux que 1 % de la consigne.

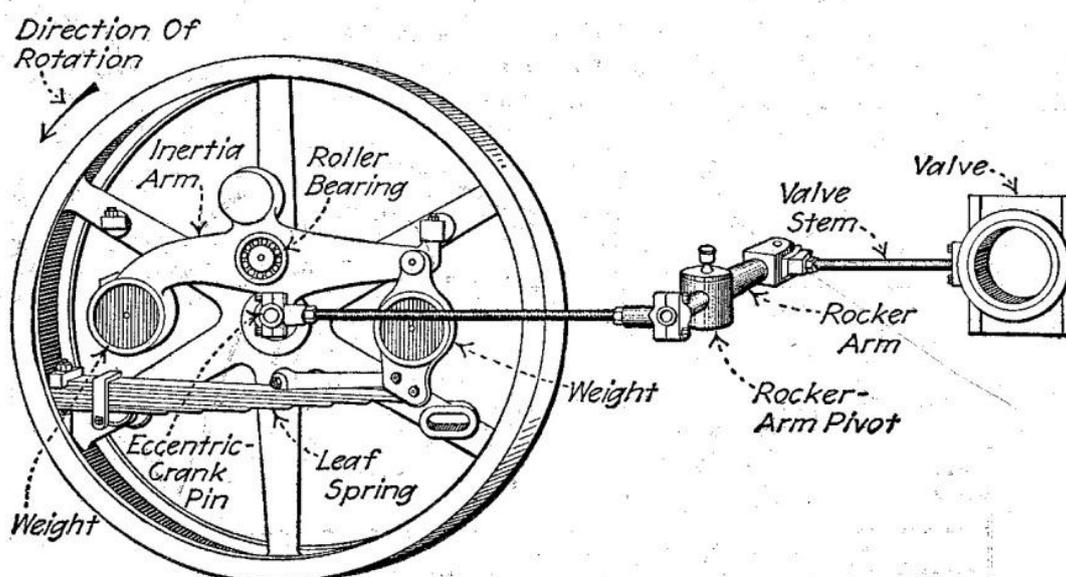


Fig. 291.—Skinner engine-governing mechanism.

Cette figure schématique d'un régulateur de type Skinner en présente les éléments essentiels : masselottes (*Weight*), ressort de rappel à lames (*Leaf spring*), arbre d'inertie (*Inertia arm*) pivotant sur roulement à bille (*Roller bearing*). Une tige de renvoi actionne une bielle oscillante (*Rocker arm*) qui déplace la tige d'excentrique (*Valve stem*). Les figures suivantes illustrent le principe de coupure d'admission pour une distribution à tiroir.

Ce document est la propriété de VAPEUR 45. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de VAPEUR 45



- VAPEUR 45 -

FOLI0 10/28 - Sept 2024

Villeneuve d'Ascq
Une ville en mouvement

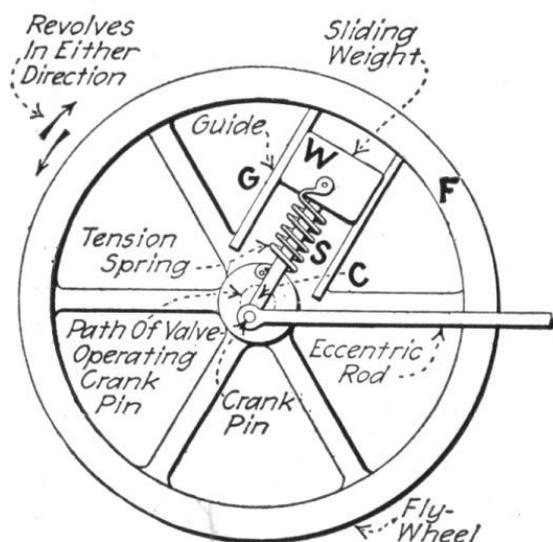
Un site régulièrement mis à jour <http://vapeur45.fr>

5.1. Fonctionnement du régulateur axial

Ce régulateur est un peu déroutant. En fait il faut le comprendre comme l'hybride d'un régulateur centrifuge et d'un régulateur à inertie.

Régulation centrifuge

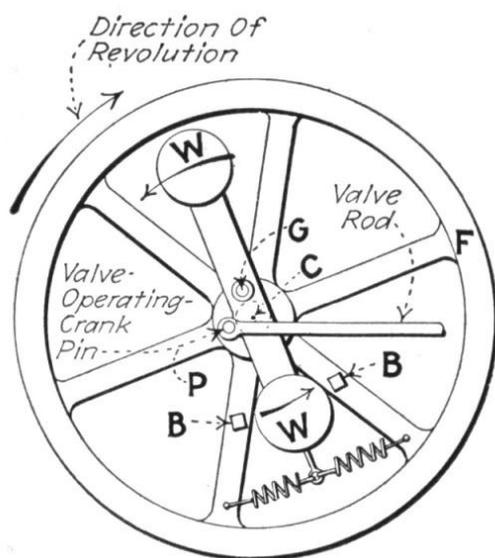
Si l'on imaginait un régulateur axial uniquement centrifuge il se ramènerait au principe du schéma suivant.



Une masse W évolue en étant guidée par des glissières radiales G . Un ressort de rappel S , solidaire du volant F l'empêche d'être éjectée lorsque le volant F est en rotation. C est le centre de rotation du volant F . Pour une vitesse donnée le système masse-ressort est en équilibre. L'axe du maneton (Crank pin) de la tige d'excentrique (Eccentric rod) est alors stabilisé et décrit une trajectoire circulaire (Path of Valve operating crank pin) en pointillés légers sur le schéma. Le diamètre de cette trajectoire va dépendre de la position d'équilibre du système masse-ressort et par voie de conséquence de la vitesse de rotation du volant.

Moyennant une conception adéquate on peut obtenir un régulateur dont le déplacement est proportionnel à la variation de vitesse de rotation du volant. Ce régulateur à la manière de celui de Watt assurerait la stabilité de la vitesse de rotation sur le long terme.

Régulation inertielle



Quiconque aura voyagé debout dans les transports en commun aura constaté que tout changement de vitesse du mobile, en accélération ou en décélération, ou tout changement de trajectoire demande un effort adaptatif du voyageur. En effet le corps du voyageur a la fâcheuse tendance à poursuivre sa trajectoire à la même vitesse alors que le mobile aura modifié l'une ou l'autre, voire les deux. C'est le principe d'inertie.

Imaginons le dispositif ci-contre.

On dispose un bras muni de deux masses égales W et pouvant tourner librement autour de son centre de gravité G . Deux ressorts de rappel de raideur faible et égale le maintiennent en équilibre. Le volant F tourne autour de son centre C . Si le volant accélère brusquement le bras va partir en rotation

Ce document est la propriété de VAPEUR 45. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de VAPEUR 45



- VAPEUR 45 -

FOLI0 11/28 - Sept 2024



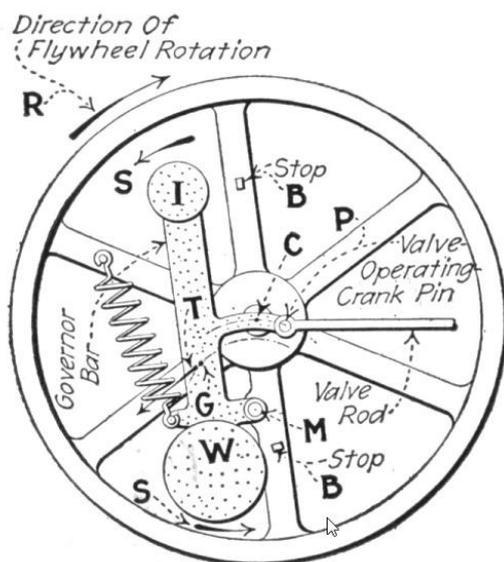
Un site régulièrement mis à jour <http://vapeur45.fr>

arrière contraire au sens de rotation du volant et réciproquement s'il ralentit.

Les butées **B** limitent les mouvements d'amplitude excessive. La tige de commande d'excentrique (*Valve rod*) pivote autour d'un maneton (*Valve operating crank pin*) solidaire du bras oscillant.

Ce dispositif inertiel doit être considéré au même titre que le volant d'inertie. Il ne garantit pas une vitesse de rotation constante, mais prend en charge les variations rapides de vitesse de rotation. Par exemple suite à une de charge de travail additionnelle du moteur,. Il réagit vite et directement sur la commande de coupure d'admission.

Principe de combinaison des deux effets



Sur ce schéma, plus proche de la réalité, on voit comment les deux effets, centrifuge et inertiel, sont combinés. C est le centre de rotation du volant d'inertie

Le bras de régulation porte deux masses inégales I et W. Le bras lesté de ses deux masses pivote autour de **M**, point qui ne se trouve pas au centre de gravité. Le centre de gravité du bras est en **G**. La disposition est telle que le bras sera soumis à la fois à la force centrifuge et à l'effet de l'inertie. Des butées **B** limitent l'amplitude de la rotation.

Le bras, via le maneton **P** actionne la tige d'excentrique (*Valve rod*)

Supposons que le volant démarre dans le sens R . Comme sa vitesse augmente, le centre de gravité du bras tend à se déplacer vers l'extérieur de la jante du volant, mais le ressort de rappel entre en action. Le système atteint un équilibre. Si pour une cause quelconque la vitesse du volant venait à brusquement augmenter, le bras par effet inertiel se déplacerait dans le sens de la flèche S. Par effet direct l'axe de maneton P se déplacerait en direction du centre C, réduisant la course de la valve vapeur. Cette réduction de course anticipe la coupure d'admission et le moteur ne peut plus accélérer. Une accélération nulle, signifie que la vitesse de rotation devient constante et l'effet inertiel disparaît, mais l'effet centrifuge demeure et donc la nouvelle vitesse est maintenue.

Ce document est la propriété de **VAPEUR 45**. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de **VAPEUR 45**



- **VAPEUR 45** -

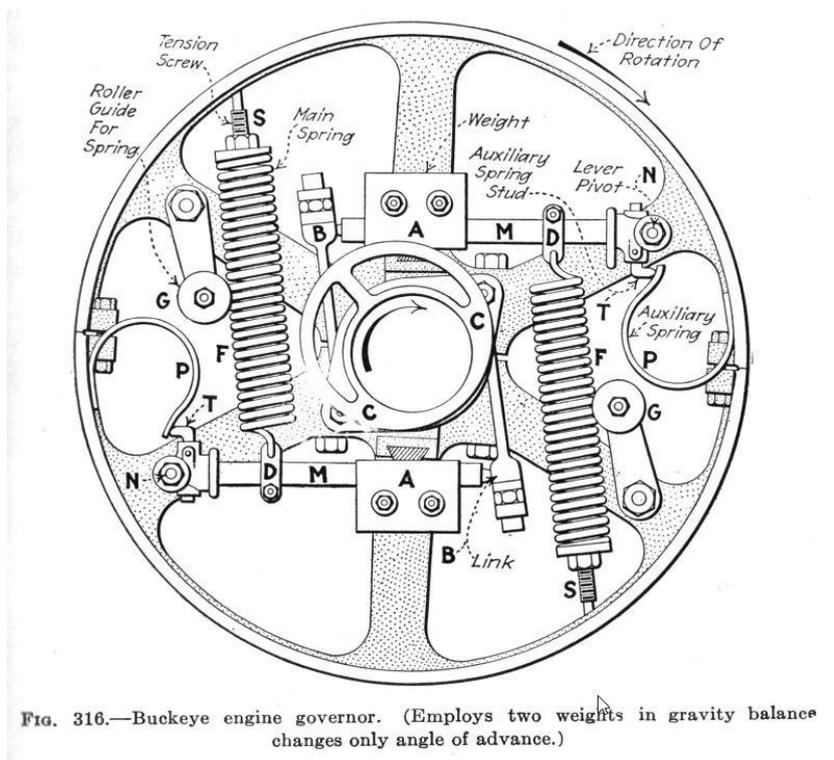
FOLI0 12/28 - Sept 2024

Villeneuve d'Ascq
Une ville en mouvement

Un site régulièrement mis à jour <http://vapeur45.fr>

6. EXEMPLE D'UN RÉGULATEUR RÉEL

Le nombre de types et sous-types marchands de régulateurs axiaux est très grand. Nous en présenterons un seul comme exemple.



Ce régulateur possède deux masses, il est donc équilibré par conception.

Ce régulateur ne contrôle que la coupure d'admission. Il ne change que l'avance angulaire de l'excentrique, la course de la valve, par exemple le tiroir, demeure constant. Les masses A sont montées sur les bras oscillants M. Ceux-ci pivotent autour de N. Les bielles B connectent les bras oscillants sur les joues d'excentrique C. Le déplacement angulaire de l'excentrique C est de 90° maximum.

Quand les masses A sont déplacées vers l'extérieur par effet centrifuge elles sont soumises à une force de rappel des ressorts F. Les ressorts F sont attachés aux bras par des clips D dont la position peut être modifiée, modifiant en cela la force rappel du ressort par variation du bras de levier. Les ressorts sont attachés à la jante du volant par une vis de pré-tension S. Les ressorts auxiliaires P qui agissent en T sur les bras augmentent la force de rappel aux basses vitesses. Les guides à rouleau G préviennent la déformation des ressorts sous l'effet de la force centrifuge lors la vitesse de rotation dépasse 250 trs/mn.

Ce document est la propriété de VAPEUR 45. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de VAPEUR 45



- VAPEUR 45 -

FOLI0 13/28 - Sept 2024

 Villeneuve d'Ascq
Une ville en mouvement

Un site régulièrement mis à jour <http://vapeur45.fr>

7. NOTIONS COMPLÉMENTAIRES

Malgré son apparente simplicité, le régulateur de Watt et ses proches cousins ont un comportement dynamique complexe, au point que de grands noms des mathématiques ont développé des modèles et des méthodes pour étudier ce problème. Dans ce chapitre nous exposons quelques notions qui permettent cependant de mieux comprendre et mieux mettre au point un régulateur centrifuge.

Un régulateur doit posséder trois qualités : stabilité, précision, rapidité de réponse. Comme de bien entendu ces trois propriétés sont contradictoires. Tout le problème est de trouver un compromis satisfaisant.

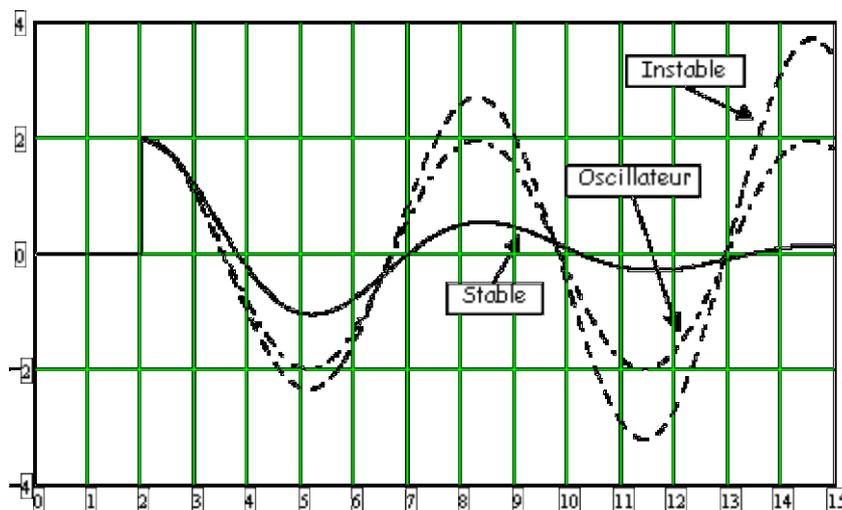
Stabilité :

Une définition intuitive est : un système est stable si, écarté de sa position d'équilibre, il revient à sa position initiale après un régime transitoire. C'est la qualité première recherchée.

Un dispositif de régulation pourra être stable, oscillant ou instable. Les régulateurs centrifuges n'échappent pas à ces trois cas de figure. Le régime instable est bien sûr à proscrire, de toute façon on adjoindra systématiquement au régulateur des dispositifs de sécurité indépendants.

Le régime de poursuite indéfini peut causer des dommages car les machines vont continuellement accélérer et ralentir. Ce régime est aussi appelé oscillant bien que l'amplitude des « oscillations » ne soit pas nécessairement constante.

Le graphique suivant est une illustration de ce qui précède.



La perturbation intervient à l'instant $t = 2$.

Précision

Lorsque la stabilité est assurée et qu'un nouveau régime permanent est atteint après la perturbation ou encore le changement de consigne, on cherche à réduire au minimum l'écart

Ce document est la propriété de VAPEUR 45. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de VAPEUR 45



- VAPEUR 45 -

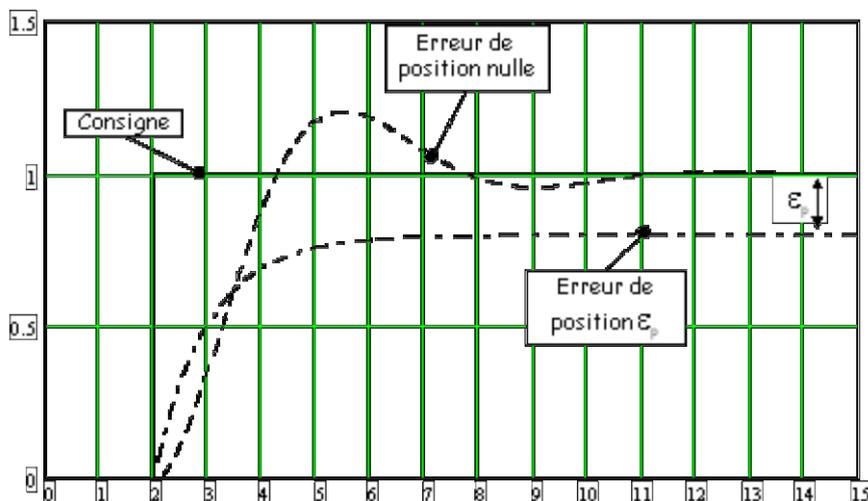
FOLI0 14/28 - Sept 2024



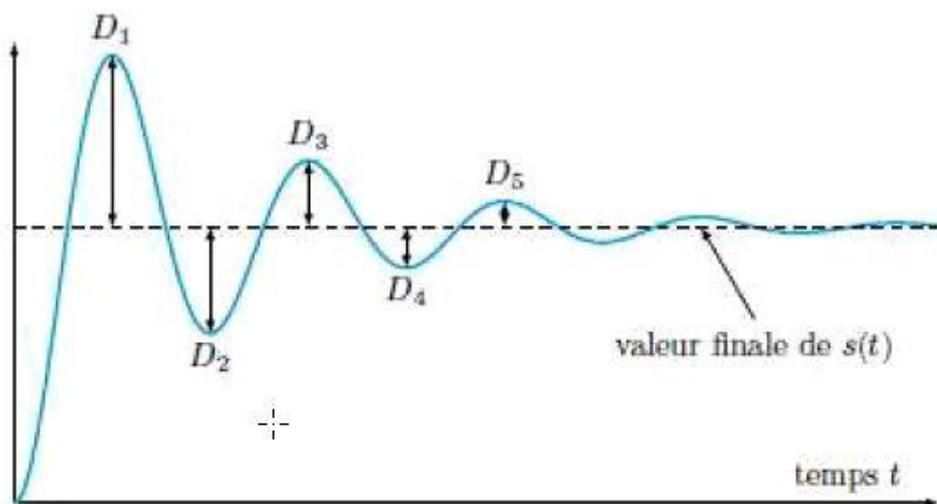
Un site régulièrement mis à jour <http://vapeur45.fr>

existant entre la consigne et la valeur réglée par le régulateur. La précision est une mesure de la qualité de réglage des grandeurs de sortie par rapport aux consignes.

Classiquement, l'erreur statique (ou de position) est la première traitée. Les erreurs dynamiques de vitesse et d'accélération font aussi partie des qualités et des performances imposées.



Pour une régulation stable on veillera cependant à ce que le premier dépassement de consigne (*overshot*) soit acceptable.



Comme indicateur on utilise le taux de dépassement relatif, en pourcentage. Il permet de caractériser l'amplitude maximale de la première oscillation.

$D1 = 100 * |(s_{t1} - s_{infini}) / s_{infini}|$ avec s_{t1} = amplitude du premier dépassement et s_{infini} = valeur finale de la réponse du système.

Ce document est la propriété de VAPEUR 45. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de VAPEUR 45



- VAPEUR 45 -

FOLI0 15/28 - Sept 2024

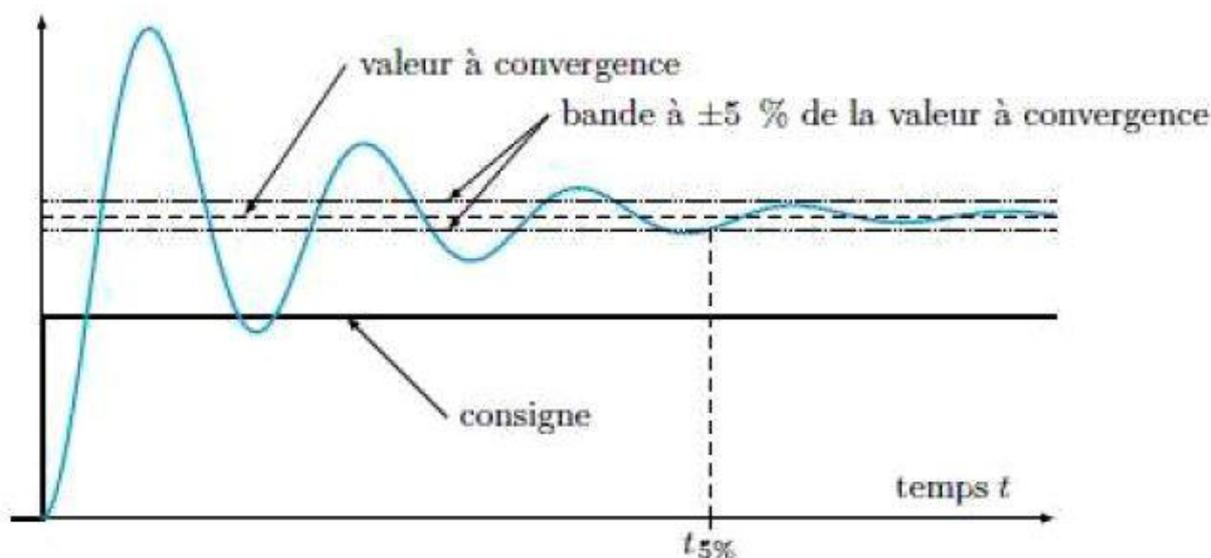


Un site régulièrement mis à jour <http://vapeur45.fr>

Rapidité

On se base sur le temps de réponse, c'est à dire le temps nécessaire pour se retrouver dans une zone où l'on encadre la consigne à $\pm x\%$. Des valeurs courantes sont $\pm 5\%$ ou $\pm 1\%$.

Une façon d'évaluer la rapidité de réglage est l'utilisation de la notion de temps de réponse à $x\%$ qui est le temps que met le système pour entrer définitivement dans une zone encadrant à $x\%$ la valeur finale.



Le tableau de la page suivante donne des indications sur les effets des principaux réglages à envisager. On n'échappe pas à une mise au point par essais-erreurs. D'une façon générale la qualité d'usinage et d'assemblage du régulateur sont un préalable incontournable avant d'envisager des modifications.

Ce document est la propriété de **VAPEUR 45**. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de **VAPEUR 45**



- VAPEUR 45 -

FOLI0 16/28 - Sept 2024

 **Villeneuve d'Ascq**
Une ville en mouvement

Un site régulièrement mis à jour <http://vapeur45.fr>

FICHE TECHNIQUE REGULATEUR VAPEUR

FPe41

Changement	Poulie/ Pignon	Masselottes	Tension ressort Masse additionnelle	Tension ressort vs Masse additionnelle	Charge & vitesse	Bras de levier	Levée des biellettes	Dash-pot
	Accroissement du rapport d'entraînem ent	Accroissement de masse	Accroissement tension ou masse	Remplacer tout ou partie de la force de rappel du ressort par une masse additionnelle	Vitesse d'entraînement augmentée	Accroissement bras de levier de la biellette porte-masse descendante	Diminution de l'ouverture de la valve pour une position donnée du régulateur	Ajutage plus étroit ou huile plus visqueuse
Effet principal	Diminue la vitesse moteur	Régulateur plus puissant mais plus « mou »	Augmente vitesse moteur	Régulateur plus « mou »	Sensibilité augmentée, vitesse moteur sensiblement inchangée	Régulateur plus puissant	Moteur plus lent	Régulateur plus « mou »
Autres effets		Pour régulateurs à masse additionnelle : moteur plus lent, sensibilité moindre	Pour régulateurs à masse additionnelle : sensibilité améliorée	Tendance à vibrer	Régulateur en régime de poursuite sans convergence	Régulateur plus puissant	Position d'équilibre différente à vitesse donnée	Tendance réduite à passer en régime de poursuite sans convergence

Les changements opposés produiront des actions opposées.

Ce document est la propriété de VAPEUR 45. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de VAPEUR 45



- VAPEUR 45 -

FOLI0 17/28 - Sept 2024

Villeneuve d'Ascq
Une ville en mouvement

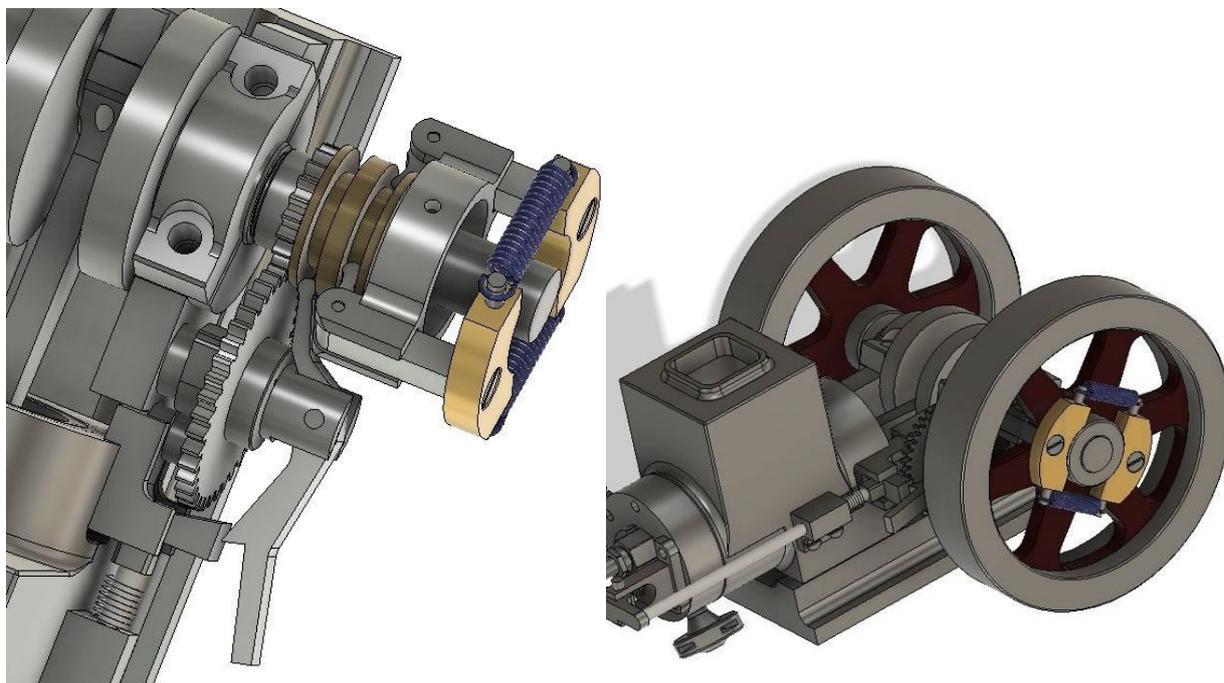
Un site régulièrement mis à jour <http://vapeur45.fr>

8. RÉGULATEURS EN MODÉLISME VAPEUR

8.1. Remarques préliminaires

Nota : nous ne traiterons pas des régulateurs axiaux car, d'une part nous n'avons aucune expérience dans le domaine, d'autre part nous n'avons pas à ce jour connaissance d'une réalisation opérationnelle en modélisme vapeur.

- A partir d'une certaine échelle de modèle on peut envisager de concevoir un régulateur à masselottes de type Watt commandant une vanne d'admission. Même si on possède l'outillage et le savoir faire pour fabriquer un régulateur à l'échelle exacte, celui-ci devrait alors tourner à très grande vitesse pour espérer avoir une puissance suffisante pour vaincre les forces en jeu, sans compter les problèmes pour actionner la vanne vapeur avec une amplitude et une précision suffisante. Ici encore des compromis seront à trouver.
- En modélisme vapeur les régulateurs à masselottes sont très largement à axe vertical, même si on en trouve à axe horizontal sur les moteurs verticaux comme les moteurs marins. Par contre pour les modèles de moteur à explosion de type *Hit'n miss* les régulateurs à masselotte sont majoritairement à axe horizontal et montés sur le volant d'inertie du moteur.
- Compte tenu de la taille et de la vitesse de rotation des moteurs en modèle réduit, les régulateurs actifs seront tous du type à ressort de rappel.



Le plus souvent ce régulateur est du type *Wilson-Hartnell*. Il commande, via un poussoir et un encliquetage la commande de soupape d'échappement.

Ce document est la propriété de **VAPEUR 45**. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de **VAPEUR 45**



- **VAPEUR 45** -

FOLI0 18/28 - Sept 2024

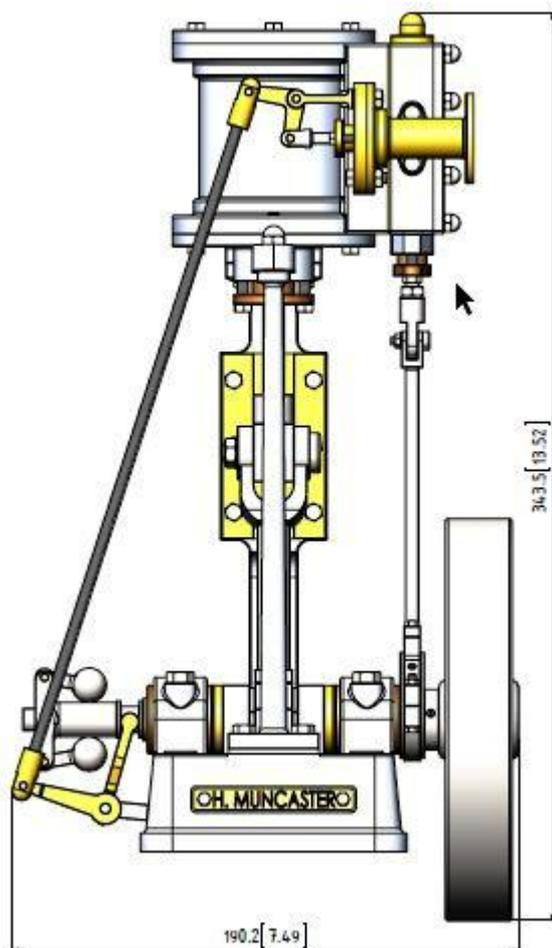
 **Villeneuve d'Ascq**
Une ville en mouvement

Un site régulièrement mis à jour <http://vapeur45.fr>

FICHE TECHNIQUE REGULATEUR VAPEUR

FPe41

Ci-dessous modèle de moteur vertical conçu par le modéliste anglais CH. Muncaster.



Ce document est la propriété de VAPEUR 45. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de VAPEUR 45



- VAPEUR 45 -

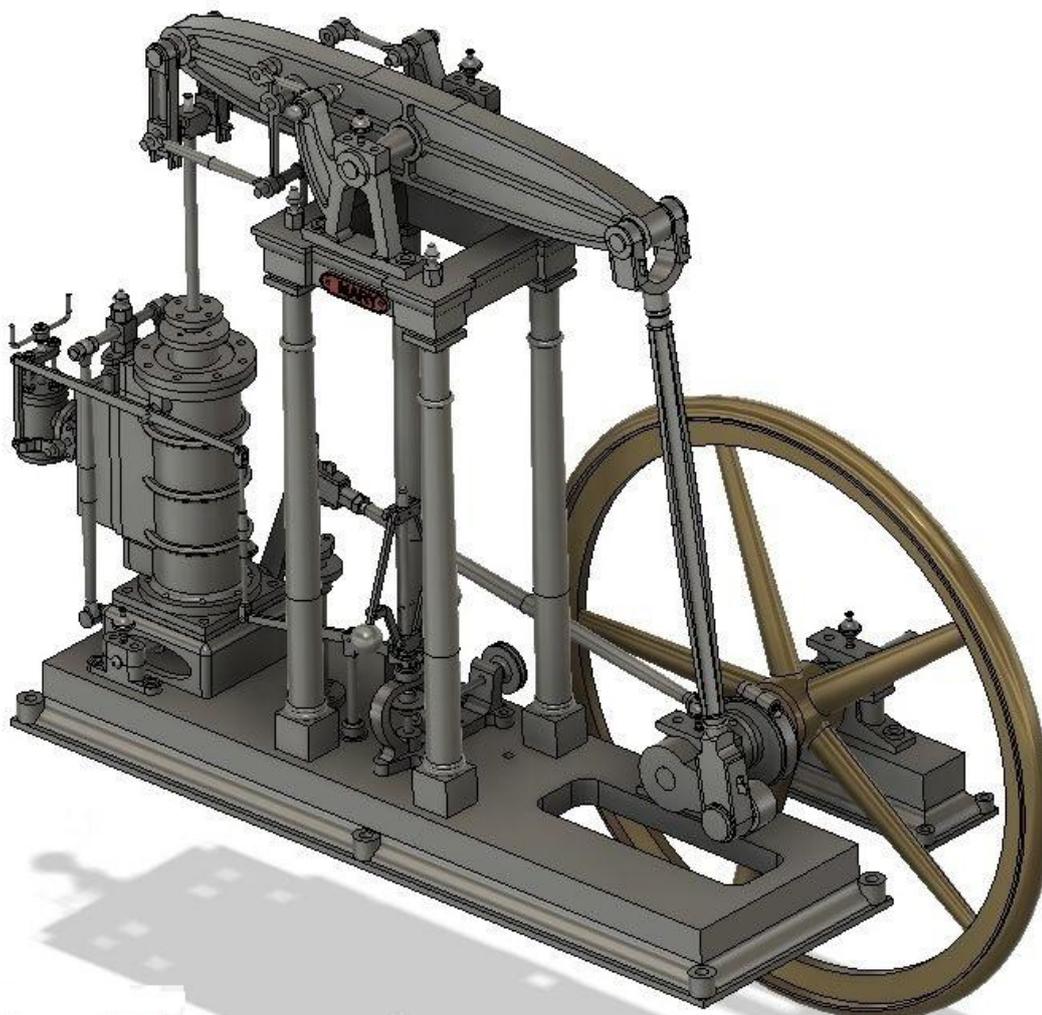
FOLI0 19/28 - Sept 2024

 Villeneuve d'Ascq
Une ville en mouvement

Un site régulièrement mis à jour <http://vapeur45.fr>

9. EXEMPLE DE RÉGULATEURS

Ci-après on voit une machine à balancier due au modéliste anglais Tubal Cain. Ces machines sont censées fonctionner à très basse vitesse entre 30 et 60 coups par minute. La machine sur la figure qui suit est une semi maquette, elle reproduit assez précisément le système de contrôle à régulateur de Watt.



Ci dessus une vue d'ensemble de la machine à balancier dont la vitesse est menée par un régulateur de Watt classique.

Ce document est la propriété de **VAPEUR 45**. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de **VAPEUR 45**



- VAPEUR 45 -

FOLI0 20/28 - Sept 2024

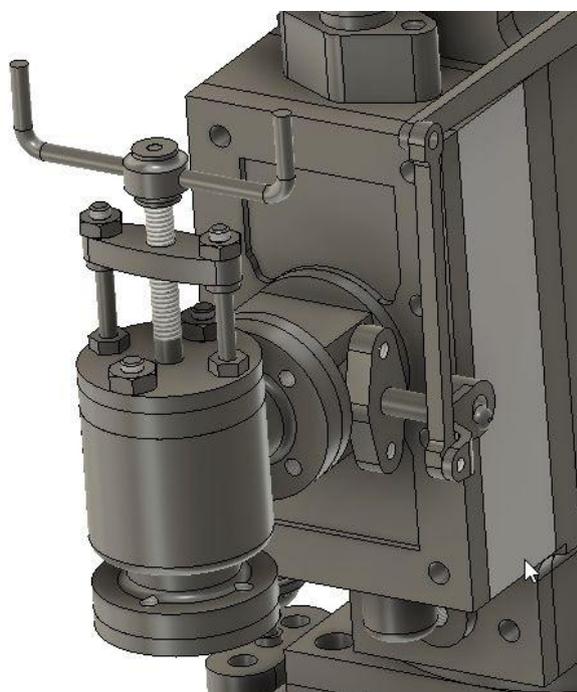
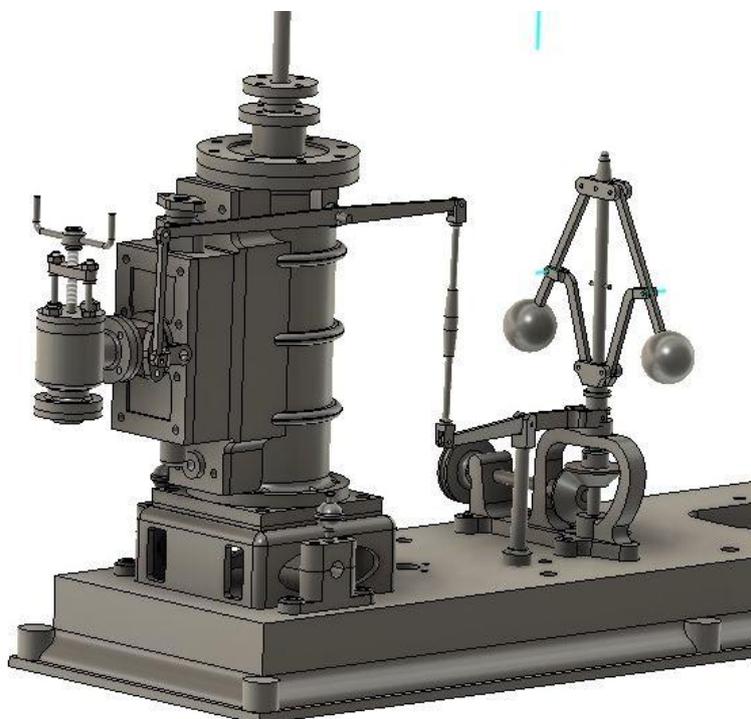
 **Villeneuve d'Ascq**
Une ville en mouvement

Un site régulièrement mis à jour <http://vapeur45.fr>

FICHE TECHNIQUE REGULATEUR VAPEUR

FPe41

Sur la vue qui suit, on observe le système complet de régulation avec son agencement de biellettes et de tiges de renvoi. Tout ce système opère une vanne papillon sur l'admission.



Au premier plan de la vue ci-contre on voit la vanne d'isolement. Derrière elle, se trouve la vanne réglante, de type volet papillon, commandée par le régulateur à masselottes.

Ce document est la propriété de **VAPEUR 45**. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de **VAPEUR 45**



- VAPEUR 45 -

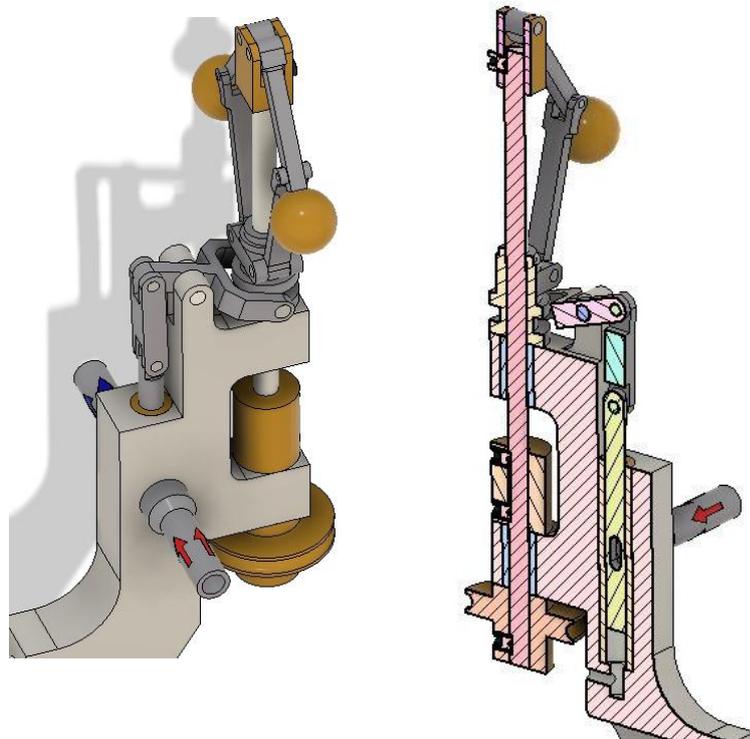
FOLI0 21/28 - Sept 2024

 **Villeneuve d'Ascq**
Une ville en mouvement

Un site régulièrement mis à jour <http://vapeur45.fr>

9.1. Modèle compact avec valve de type piston guillotine

On trouve aujourd'hui, dans le commerce, des régulateurs moins complexes à construire et plus compacts.



Le réglage vapeur est obtenu par le déplacement d'un piston percé radialement par une lumière comme le montre la coupe des figures précédentes. Ces régulateurs commerciaux, de fabrication chinoise, fonctionnent mais, au dire des utilisateurs, la régulation est assez brutale, à vrai dire assez proche d'une régulation en tout ou rien. En travaillant sur la raideur du ressort ainsi que sur la géométrie et la taille de la lumière du piston guillotine une plus grande progressivité pourrait certainement être obtenue.

Ce document est la propriété de **VAPEUR 45**. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de **VAPEUR 45**



- **VAPEUR 45** -

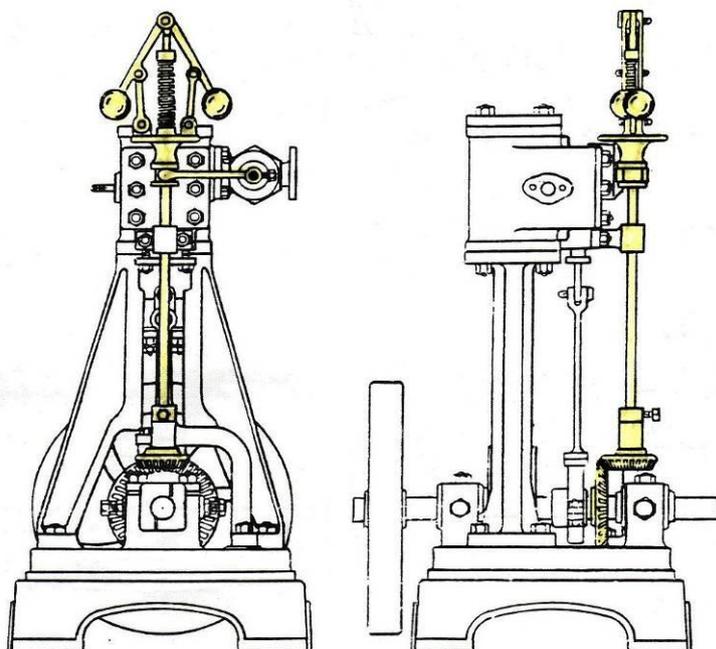
FOLI0 22/28 - Sept 2024

Une ville en mouvement

Un site régulièrement mis à jour <http://vapeur45.fr>

10. EXEMPLE AVEC PLANS DE RÉGULATEURS EN MODÉLISME

Régulateur du moteur "Nicholas", moteur d'orgue à l'échelle 1/8^e de Ronald H Clark à partir de dessins originaux de Savage. Les moteurs alimentaient l'orgue accompagnant les chevaux de bois du parc des expositions. Alésage du moteur 12 mm, course 22 mm.



Le moteur a été transformé pour propulser un bateau à vapeur initialement prévu pour fonctionner au charbon. La régulation d'une vitesse constante était nécessaire afin de fournir un tirage constant au niveau du foyer. Les manœuvres de marche avant, arrêt et marche arrière étaient réalisées par une hélice à pas variable.



Comme nous l'avons expliqué dans le chapitre précédent, sur les machines réelles, les poids à billes rotatifs du régulateur produisaient non seulement l'effort de fonctionnement positif, sous l'effet de la force centrifuge, mais aussi l'effort négatif ou de rappel, sous l'effet de la gravité. Aucun poids ou ressort supplémentaire n'était utilisé, et la disposition de l'arbre vertical était essentielle à son fonctionnement. Cette forme, ne peut pas être recommandée pour les petits moteurs, la raison bien sûr est que dans une petite taille, l'effet gravitationnel est réduit dans une bien plus grande mesure que le frottement dans les pièces en fonctionnement, le rappel par ressort est une nécessité évidente.

Il est également nécessaire d'augmenter l'effort positif en faisant fonctionner les régulateurs en modélisme à une vitesse plus élevée. Dans le cas présenté, l'entraînement du régulateur s'effectue par un jeu de pignons conique avec un rapport de multiplication de 2, une roue dentée de 30 dents sur l'arbre moteur et un pignon de 15 dents sur l'arbre du régulateur.

Ce document est la propriété de **VAPEUR 45**. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de **VAPEUR 45**



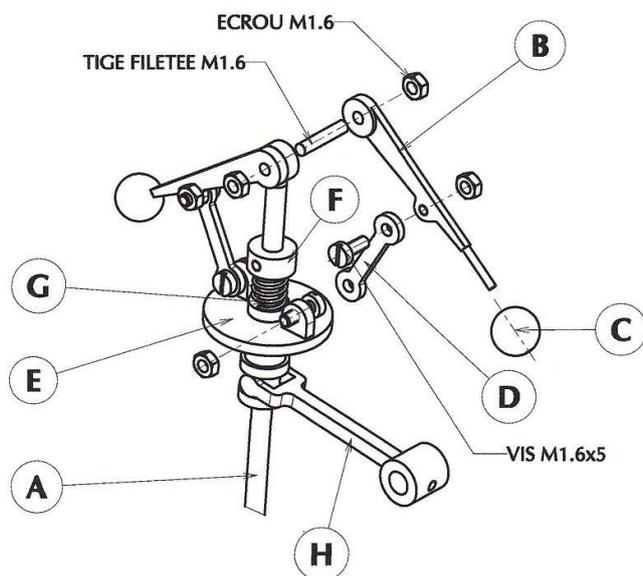
- VAPEUR 45 -

FOLIO 23/28 - Sept 2024

Villeneuve d'Ascq
Une ville en mouvement

Un site régulièrement mis à jour <http://vapeur45.fr>

10.1. Nomenclature du régulateur

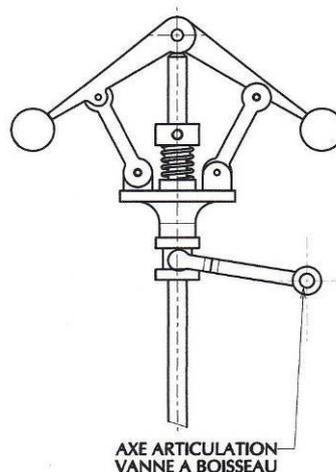
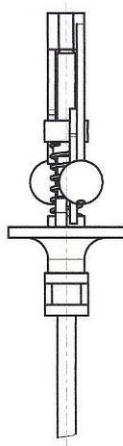
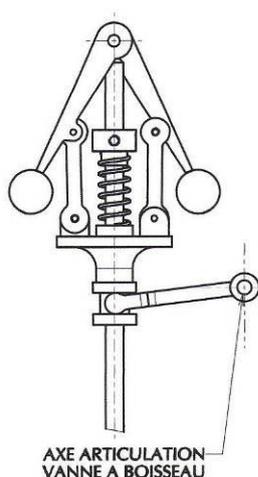


- A** Arbre vertical
- B** Levier oscillant
- C** Masselotte, bille
- D** Bielle
- E** Collier rainuré
- F** Butée
- G** Ressort
- H** Fourchette

10.2. Description du modèle

Lorsque les billes (**C**) se déplacent vers l'extérieur sous l'effet de la force centrifuge, les leviers (**B**) auxquels elles sont fixées soulèvent le collier rainuré (**E**), ce qui provoque l'oscillation de la fourchette (**H**), qui elle, actionne la vanne à boisseau. Le régulateur illustré possède un ressort de compression (**G**) monté sur l'arbre vertical, qui exerce une pression entre le collier rainuré et la butée (**F**).

Le dessin de gauche illustre le régulateur en position en repos. Sur le dessin de droite, le régulateur en position de fonctionnement. On notera que le ressort est comprimé et que la fourchette a oscillé sur l'axe d'articulation.



Ce document est la propriété de **VAPEUR 45**. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de **VAPEUR 45**



- VAPEUR 45 -

FOLI0 24/28 - Sept 2024

Villeneuve d'Ascq
Une ville en mouvement

Un site régulièrement mis à jour <http://vapeur45.fr>

10.4. Note d'atelier :

La réalisation de ce régulateur ne nécessite pas de compétence particulière, néanmoins, au vue de la taille des pièces, une certaine minutie et recommandée.

Arbre vertical Rep A

Après brasage de la rondelle ép. 2, on veillera à araser les faces de la rondelle afin de permettre un bon positionnement des leviers oscillant Rep B. La longueur A* sera fonction de votre montage.

Levier oscillant Rep B

Après traçage sur une tôle de 1 mm et perçage du trou de 1.6 mm, détourez la pièce à la scie. La surépaisseur de 0.5 mm sera obtenue en traçant approximativement le contour. Après découpe, vous soudez à l'étain cette pièce sur un jet de laiton préalablement dressé. Au tour, vous percez le trou de 1.6 mm et tournez le diamètre 5 mm.

Cette pièce sera positionnée sur le levier par un boulon inox de M1.6 et ensuite soudé à l'étain. Cette rondelle servira également de gabarit pour le limage du diamètre 5 mm. C'est le moment de sortir le jeu de petites limes afin de finaliser cette pièce.

Pour la méthode de traçage, voir la fiche technique **FPe13** sur le site de VAPEUR 45, sous l'onglet "Fiches pratiques".

Bille Rep C

Si on essaye de percer une bille de roulement, on risque quelques déconvenues. Le métal qui les constitue est fortement allié, et s'avère quasiment impénétrable par un foret (sauf peut être au carbure de tungstène, ce qui n'a pas été testé). La préparation consiste donc simplement à annuler la trempe. Il suffit pour cela de chauffer le métal au rouge, puis de le laisser refroidir doucement à l'air. Il ne faut pas chercher à accélérer le refroidissement par quelque moyen que ce soit, même l'air comprimé (on obtiendrait une "trempe à l'air"). Ensuite, il suffit de suivre les indications de la fiche technique **FPe39** sur le site de VAPEUR 45, sous l'onglet "Fiches pratiques".

Biellette Rep D

Même méthode de réalisation que le levier Rep B.

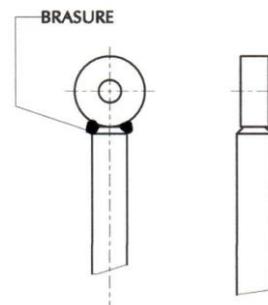
Pièce Rep E

Ebauche cylindrique dans laquelle on prévoit un tenon (côté plateau D=16 mm); on descend au diamètre fini, puis on dégage la gorge. Perçage traversant à 2.3 + alésoir 2.5 mm. On retourne et on prend en pince ER16.

Elimination du tenon. Mise aux cotes finies. Reprise en fraiseuse en pince ER (*porte pince carré pris en étau*). Usinage de deux rainures de 2 mm de profondeur sur 1.5 mm de largeur dans lesquelles se positionnent les deux oreilles (pré-percées à la cote finie). Avec de la pâte à étamer brasure des deux oreilles.

Pièce Rep F et G

Pas de problèmes particuliers pour la réalisation de ces pièces.



Ce document est la propriété de VAPEUR 45. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de VAPEUR 45



- VAPEUR 45 -

FOLI0 26/28 - Sept 2024

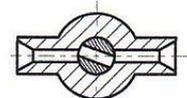
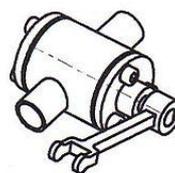


Un site régulièrement mis à jour <http://vapeur45.fr>

Fourchette Rep H

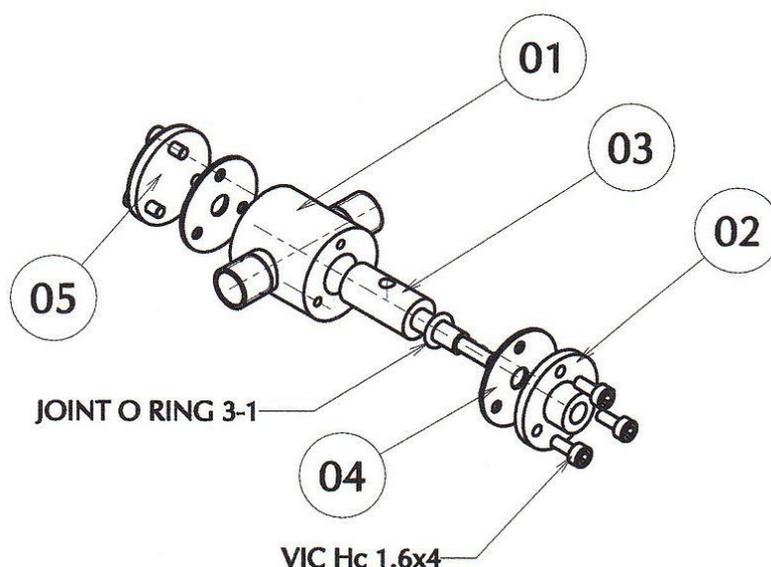
Cette pièce peut être réalisée en deux éléments, la partie fourche, fraisé dans un jet de laiton de 6x3, brasé sur le cylindre d'articulation pré-percé diamètre 6. Il n'est pas possible de donner un descriptif précis, cela dépendra de la position de la vanne de réglage par rapport au régulateur. La longueur A*, sera fonction de votre montage.

Montage de la fourchette sur la vanne de réglage.



10.5. Vanne de réglage

La méthode de contrôle la plus simple consiste à utiliser une vanne type à boisseau qui soit capable d'être actionnée avec un minimum d'effort ; il n'est pas nécessaire qu'elle soit capable de se fermer complètement, car elle constitue généralement un complément à la vanne d'arrêt du moteur principal, qui doit-elle, être étanche une fois fermée.



La vanne est réalisée principalement en laiton sauf pour le boisseau Rep. **03** qui sera en inox. Elle est composée du corps Rep. **01**, du chapeau de vanne Rep. **02**, de deux joints en Téflon Rep. **04** et du fond de vanne Rep. **05**. Le joint torique de diamètre 3 intérieur et de 1 mm de tore. La chaîne de cote permettra une légère compression de l'ordre de 2/10 de mm afin d'assurer l'étanchéité.

Ce document est la propriété de **VAPEUR 45**. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de **VAPEUR 45**



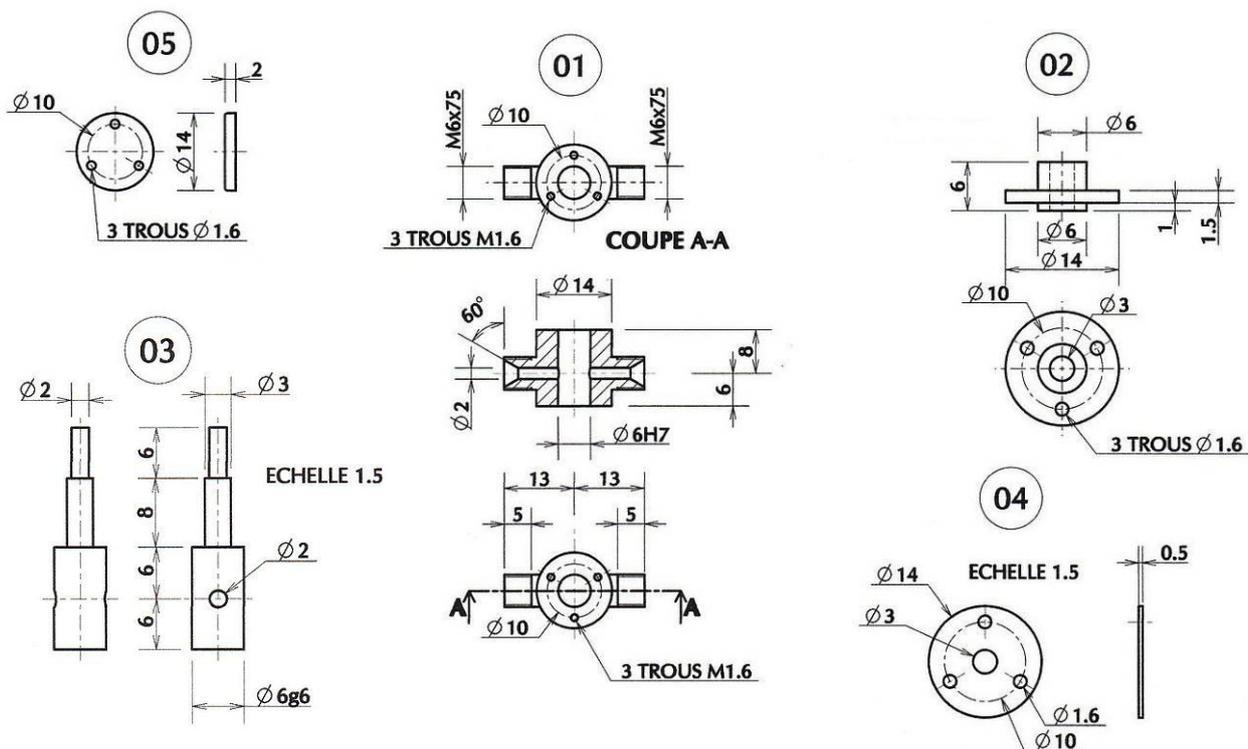
- **VAPEUR 45** -

FOLIO 27/28 - Sept 2024



Un site régulièrement mis à jour <http://vapeur45.fr>

10.6. Plan de la vanne de réglage



Ce document est la propriété de VAPEUR 45. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de VAPEUR 45



- VAPEUR 45 -

FOLI0 28/28 - Sept 2024

 Villeneuve d'Ascq
Une ville en mouvement

Un site régulièrement mis à jour <http://vapeur45.fr>