

Comprendre les systèmes hydrauliques et pneumatiques industriels

Daniel Cervera

Collège de Valleyfield

Pierre Nonnon

Université de Montréal

1. Introduction⁽¹⁾

Dans cette communication, nous exposerons les résultats de nos travaux visant à élaborer un cadre théorique pour l'analyse des circuits hydrauliques et pneumatiques, analogue à celui qui existe pour les circuits électriques. Le but de ce cadre théorique est de favoriser la compréhension du fonctionnement des systèmes d'énergie des fluides. Il vise à expliciter les lois et règles qui déterminent le comportement des fluides (liquides et gaz) dans les circuits, à partir d'une analyse essentiellement qualitative des phénomènes qui se produisent dans les systèmes de vases communicants.

Nous exposerons d'abord quelques réflexions concernant l'épistémologie de la discipline ; par la suite, nous dégagerons les règles de l'écoulement des fluides ; nous proposerons ensuite une approche pour l'analyse des systèmes, basée sur les règles en question et sur le fait qu'ils constituent, en fait, des vases communicants. Finalement, nous exposerons, à titre d'exemple, l'étude d'un système hydraulique simple ainsi qu'une brève conclusion.

2. Perspective épistémologique

Le comportement des systèmes hydrauliques et pneumatiques industriels est complexe et sa compréhension ne relève pas de la simple évidence. Malheureusement, ni les manuels d'apprentissage, ni les ouvrages plus spécialisés, n'exposent l'ensemble des règles qui sous-tendent ce comportement, de sorte que les étudiants éprouvent des difficultés majeures à comprendre, à analyser et à anticiper le fonctionnement de tels systèmes. Quant aux enseignants, cette absence de règles

1 La recherche qui est à la base de cette communication a été subventionnée par le ministère de l'Éducation dans le cadre du Programme d'aide à la recherche sur l'enseignement et l'apprentissage. Ce texte reprend les principaux aspects traités dans un article qui a été soumis pour publication dans *Didaskalia*.

explicites laisse la place à plusieurs interprétations et explications différentes de ce fonctionnement.

Du point de vue épistémologique, nous remarquons qu'en hydraulique et pneumatique, il n'y a pas l'équivalent de la théorie des circuits électriques, largement enseignée et bien connue des praticiens, et qui s'articule autour des lois d'Ohm et de Kirchhoff, de règles d'analyse de la topologie des circuits (structure en noeuds, branches...) et de règles de simplification des circuits au moyen de circuits équivalents. Nous constatons aussi que ni les manuels d'apprentissage d'hydraulique et de pneumatique, ni les ouvrages plus spécialisés, n'exposent l'ensemble des règles qui sous-tendent le comportement de ces systèmes. Un simple survol de ces manuels permet de remarquer que la plupart d'entre eux font état des principales lois qui concernent ces domaines, comme les lois de Pascal, de Bernoulli, de la compressibilité des gaz, etc. Cependant, ces lois sont présentées comme allant de soi, de manière détachée et sans liens épistémologiques entre elles ni avec le reste des contenus ; elles sont rarement mises à contribution ultérieurement, de sorte que l'étudiant doit en deviner la portée, le champ de validité et le contexte d'application ; il doit aussi les intégrer et discerner celles qui sont susceptibles de s'appliquer dans tel ou tel cas particulier.

3. Les règles de l'écoulement des fluides

Comme nous le verrons, l'étude qualitative du comportement du liquide dans les vases communicants ouvre la voie à la compréhension du comportement des systèmes hydrauliques et pneumatiques ; les phénomènes qui s'y produisent sont de même nature ; aussi, l'analyse de ces phénomènes nous permettra de dégager les règles sous-jacentes auxquelles obéissent ces systèmes.

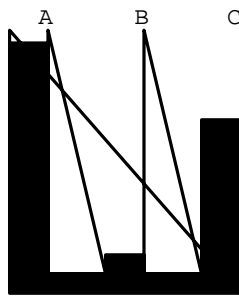


Figure 1

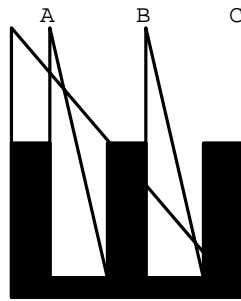


Figure 2

La situation illustrée à la figure 1 représente un système de vases communicants dans lequel le niveau de liquide n'est pas égal dans toutes les branches. Cette situation constitue un état transitoire de déséquilibre, un état instable possible seulement pendant qu'il y a écoulement, c'est-à-dire pendant que le liquide se déplace vers une position stable. La loi des vases communicants précise que le liquide se stabilisera lorsque le niveau sera identique dans toutes les branches : le niveau des branches A et C cherchera à descendre, faisant monter celui de la branche B, tel qu'illustré à la figure 2. Cette loi est simple et accessible ; cependant, elle ne dit rien pour ce qui est de la manière dont le liquide se comporte et se distribue pour parvenir à cet état d'équilibre. C'est précisément l'étude de ce comportement qui nous conduira à dégager les lois de l'écoulement des fluides.

Pourquoi le liquide cherche-t-il cet état d'équilibre ? Comment le passage d'un état à l'autre se fait-il ? Y a-t-il un ordre d'écoulement pour chaque branche ? Cet écoulement se fait-il simultanément dans toutes les branches ? Voilà le type de questions que nous abordons.

En premier lieu, le liquide, comme tout autre corps, obéit à la loi de la gravitation. Il a donc tendance à descendre. Cependant, ici, la descente d'une branche implique la montée d'autres branches, car, selon la loi de la conservation de la matière, la quantité de liquide doit demeurer constante, tout comme son volume, puisque les liquides sont incompressibles. Dès lors, la simple loi de la gravitation semble insuffisante, voire conflictuelle, pour expliquer la situation, en ce sens que pour satisfaire la tendance à descendre d'une branche haute, il faut qu'une autre branche plus basse se comporte à l'encontre de cette tendance. Pour clarifier cette apparente ambiguïté, il convient de préciser que la gravité implique que tout corps tend à se déplacer dans le sens du moindre potentiel global. En d'autres mots, un corps " désobéira " à la gravité, c'est-à-dire montera si, ce faisant, il permet à un autre corps de descendre et que, dans cet échange, la somme d'énergie potentielle des deux corps diminue. C'est ce qui se produit dans les vases communicants : une branche haute descend et en fait monter une autre plus basse ; l'énergie potentielle de l'ensemble est ainsi réduite (le centre de gravi-

té de la masse liquide descend). La portée de cette explication est très large ; elle permet notamment de considérer le phénomène de la poussée d'Archimède comme une simple manifestation de la gravitation. En effet, on peut dire qu'un corps immergé remontera à la surface (augmentant ainsi son énergie potentielle) seulement si, ce faisant, il permet à une masse plus importante de fluide de prendre sa place et de réduire son énergie potentielle. Cette même explication s'applique dans le cas d'un ballon gonflé à l'hélium ou d'une montgolfière.

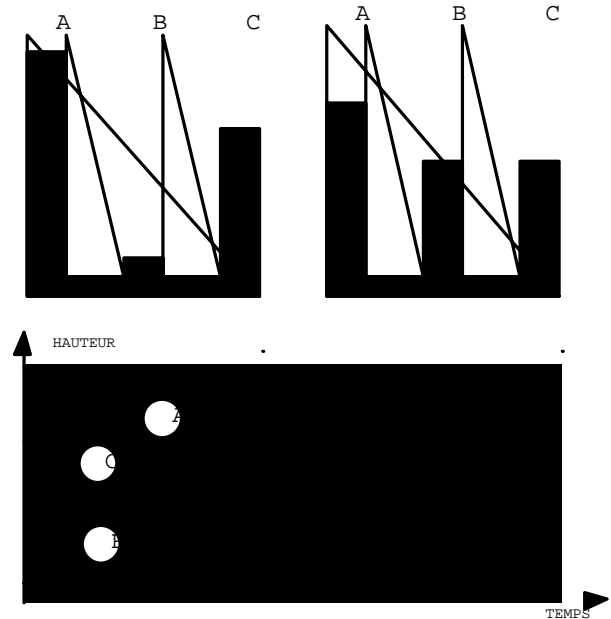


Figure 3

En deuxième lieu, il s'agit d'expliciter la manière selon laquelle s'effectue cet écoulement, ce que nous ferons au moyen de l'analyse qualitative du comportement de la situation de la figure 3. En fait, le processus d'écoulement est quelque peu inattendu : dans un premier temps, les branches A et C se vident simultanément vers B jusqu'à ce que les niveaux de B et C soient égaux. Ensuite, la branche A continue à se vider, faisant alors monter B et C ensemble, jusqu'à l'état final d'équilibre. Comme l'indique le graphique, le passage d'une phase à l'autre correspond à l'intersection des courbes B et C.

Si nous observons le comportement d'un système de vases communicants comportant un conduit avec une restriction, nous constaterons que le débit dans cette branche sera réduit ; par le fait même, le comportement du système change. Ainsi, dans le cas de la figure 4, les conduits A et C ont d'abord tendance à se vider vers B, mais l'étranglement empêche la montée libre de cette branche. Dès lors, une partie du débit de A se vide en priorité vers B et le reste se dirige vers C. Cette première phase se poursuivra jusqu'à ce que A et C soient

au même niveau. Ensuite, les branches A et C descendent ensemble et remplissent graduellement B, jusqu'à la stabilisation finale des trois niveaux.

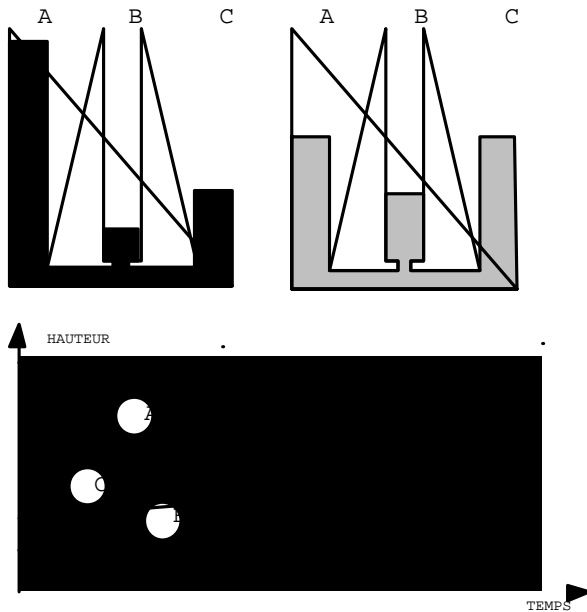


Figure 4

Dans le cas de la figure 5, premièrement les branches A et B se vident vers C ; toutefois, la descente de B est ralentie par l'étranglement. Cette première phase se termine lorsque les niveaux de B et C sont à égalité. Dans une deuxième phase, A continue à descendre faisant alors monter B et C. Cependant, étant donné que B ne peut pas recevoir tout le débit venant de A, C montera jusqu'à égalité avec A, créant une nouvelle condition de déséquilibre. Finalement, durant la troisième phase, A et C descendront ensemble et feront monter graduellement B jusqu'à la position finale d'équilibre.

Bien entendu, il existe plusieurs configurations possibles d'étranglements pouvant donner lieu à un grand nombre de situations différentes. On remarquera que, avec les étranglements, un même système de vases communicants peut donner lieu à plusieurs phases intermédiaires distinctes. Cependant, le comportement de chaque phase obéit aux mêmes règles. On remarquera aussi qu'il n'est pas aisé d'anticiper ce comportement, somme toute assez complexe, sans en connaître l'ensemble des règles qui le sous-tendent. Bien que la loi des vases communicants exprime clairement la situation finale d'équilibre, elle n'est guère utile pour analyser le comportement du liquide pour y parvenir. À partir de l'analyse qualitative précédente, nous pouvons généraliser et décrire ainsi ce comportement :

Toutes les branches descendent et remplissent celle qui a le plus bas niveau (moindre pression) ; cette branche monte alors jusqu'à égalité avec la branche qui a le deuxième plus bas niveau. Par la suite, ces deux branches

reçoivent ensemble le débit et montent jusqu'à égalité avec la branche suivante, et ainsi de suite. Si la branche qui reçoit le débit présente une restriction, le débit excédentaire se dirige vers la branche suivante de plus bas niveau.

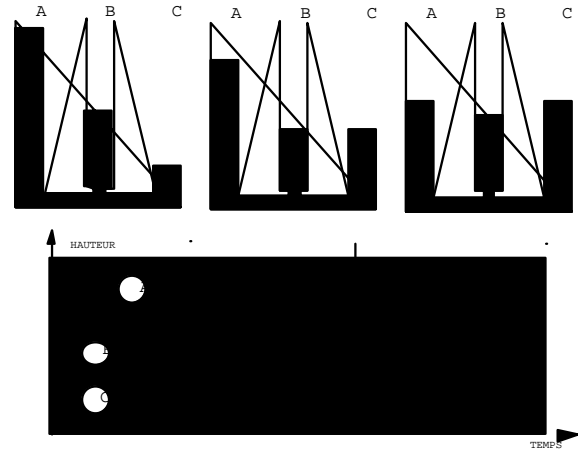


Figure 5

Lois et règles de l'écoulement des fluides

Cette description nous conduit à dégager les règles suivantes de l'écoulement des liquides :

- 1- Tout fluide tend à couler vers un lieu de moindre pression.
- 2- Dans un collecteur¹ (un embranchement), le liquide emprunte le conduit de moindre pression.
- 3- Dans un conduit, le débit d'un liquide est constant en tout point.
- 4- Dans un collecteur, la somme algébrique de fluide qui entre et qui sort est nulle.

En effet, si à un endroit donné d'un conduit il passe un certain débit, on doit le retrouver inchangé en tout autre point de ce même conduit ; autrement, il faudrait en conclure, soit que le conduit est en train d'accumuler du liquide et de gonfler, soit qu'il n'est pas étanche, soit qu'il est en train de se vider, ce qui n'est pas conforme à son rôle. Ce raisonnement s'applique aussi dans le cas d'un collecteur : la même quantité de liquide qui y entre doit nécessairement en sortir, sans égard au nombre de branches impliquées.

¹ Nous entendons par collecteur, un ensemble de conduits concurrents, reliés de manière à former des embranchements (au moins trois conduits formant une bifurcation), et entre lesquels le liquide peut circuler librement.

Finalement, une dernière règle de l'écoulement des liquides résulte aussi de la loi de la gravitation selon laquelle la pression exercée par une colonne de liquide, ainsi que la vitesse d'écoulement, sont fonction de la hauteur et du poids de cette colonne. Elle exprime le fait que l'écoulement sera d'autant plus important que la dénivellation (ou la différence de pression) entre les colonnes de liquide sera importante.

5- Dans un conduit, le débit d'un fluide est fonction du différentiel de pression en amont et en aval.

Pour ce qui est des systèmes pneumatiques, les règles de l'écoulement doivent tenir compte de la compressibilité des gaz et, conséquemment, du fait qu'ils tendent constamment à occuper la totalité du volume de leur contenant. Les règles 2 et 3 s'exprimeront respectivement ainsi :

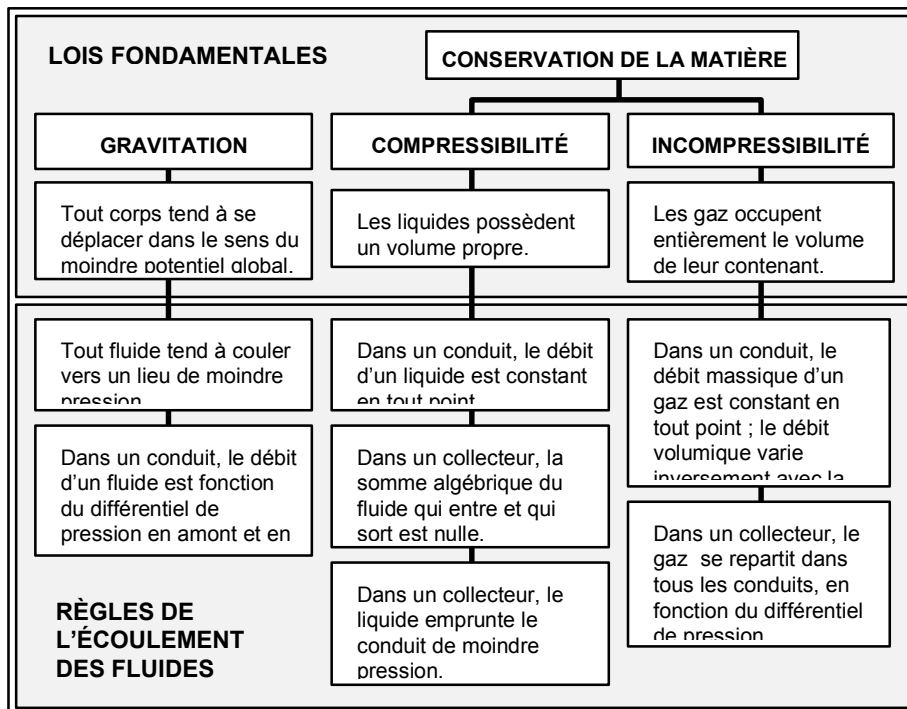
6- Dans un collecteur, le gaz se répartit dans tous les conduits, en fonction du différentiel de pression.

7- Dans un conduit, le débit massique d'un gaz est constant en tout point ; le débit volumique varie inversement avec la pression.

Cette dernière règle exprime la loi de la continuité de la matière, ce qui correspond au débit massique constant. Cependant, puisque, d'une part, tout écoulement implique un différentiel de pression et que, d'autre part, les gaz sont compressibles, le débit volumique doit nécessairement varier.

Le diagramme suivant illustre le réseau des liens qui existent entre chacune des règles de l'écoulement des fluides et les lois fondamentales de la physique.

LIENS ENTRE LES LOIS FONDAMENTALES ET LES RÈGLES D'ÉCOULEMENT DES



4. Analyse des systèmes : approche basée sur les vases communicants

Nous abordons ici le deuxième aspect de notre propos, ce qui nous conduira à proposer une nouvelle manière d'envisager les systèmes hydrauliques, basée sur le comportement du liquide dans les vases communicants, avec les règles de l'écoulement des liquides qui le sous-tendent.

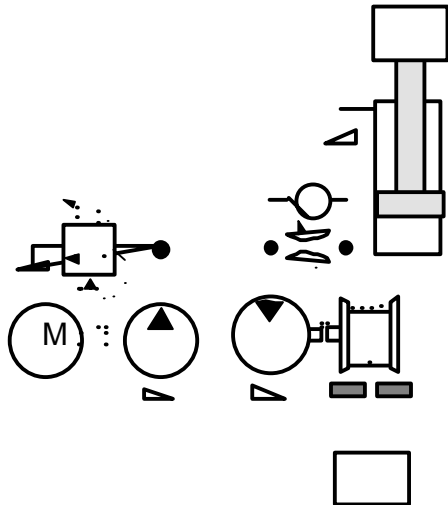


Figure 6

Selon cette conception, nous considérons les systèmes hydrauliques essentiellement comme des systèmes de vases communicants. Ainsi, le système hydraulique simplifié de la figure 6 peut être assimilé, dans une première approche, au système de vases communicants de la figure 7. La hauteur des branches indique la pression maximale que peut générer le composant (ou ensemble de composants) qu'elles représentent.

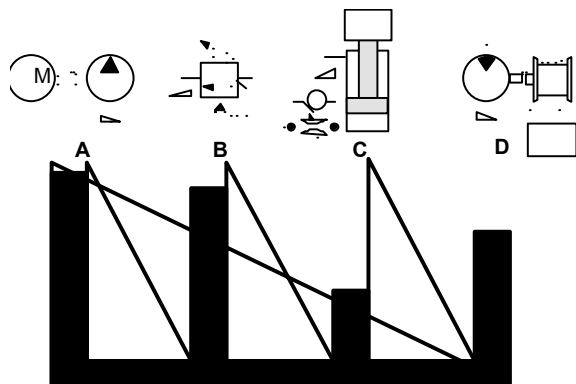


Figure 7

Nous pouvons assigner à chaque branche des attributs en fonction de leur capacité d'émettre ou de recevoir un débit, ainsi que de la pression maximale qu'elles peu-

vent générer. Dans notre exemple, les attributs seraient les suivants :

BRANCHE A (ensemble pompe-moteur électrique) : le débit qu'elle peut émettre est constant, car il est fonction de la vitesse de rotation du moteur électrique et de la cylindrée de la pompe ; le débit qu'elle peut recevoir, en vertu de la réversibilité de la pompe en moteur, est illimité ; la pression maximale que cette branche peut générer est fonction du couple du moteur et de la cylindrée de la pompe.

BRANCHE B (limiteur de pression) : le débit qu'elle peut émettre est nul puisque la nature même de ce composant fait en sorte que le débit est à sens unique, vers le réservoir ; le débit qu'elle peut recevoir est, *a priori*, illimité ; la pression maximale qu'elle peut générer est fonction du réglage du limiteur.

BRANCHE C (ensemble vérin-charge-régulateur de débit) : le débit qu'elle peut recevoir est illimité, à cause du clapet anti-retour qui permet le libre passage vers le vérin ; par contre, le débit qu'elle peut émettre est fonction de l'ouverture du régulateur ; la pression maximale est fonction de la charge et de la surface du piston du vérin.

BRANCHE D (ensemble moteur hydraulique-treuil-charge) : le débit qu'elle peut émettre et recevoir est, en principe, illimité ; la pression générée est fonction du couple à l'arbre et de la cylindrée du moteur.

L'ajout des clapets et des restrictions de la figure 8 permet de rendre plus amplement compte, en termes qualitatifs, de ces attributs, du sens de l'écoulement et de l'importance du débit qui sont possibles dans chacune des branches. Aussi, il convient de limiter la hauteur des branches en fonction de la pression qu'elles peuvent générer, ce qui évite d'induire l'idée que le niveau (et donc la pression) peut monter dans les branches à mesure qu'elles reçoivent le débit ; en limitant la hauteur, le liquide "déborde" et le niveau reste constant. Ceci correspond bien au fait que les composants reçoivent ou renvoient le liquide vers le réservoir.

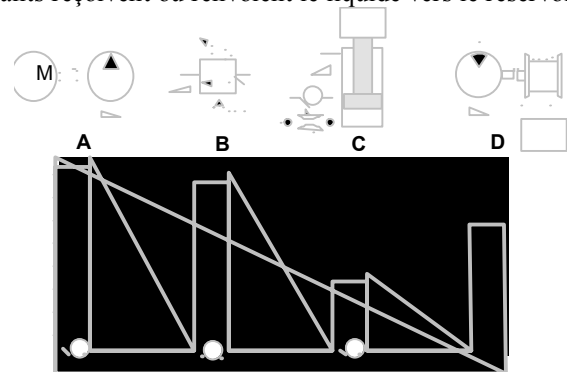


Figure 8

Les données de la figure 8 permettent d'amorcer une analyse qualitative relativement avancée du comportement du système. Elles indiquent notamment que les niveaux de pression permettent un fonctionnement

normal du système ; en effet, le niveau de la branche A est le plus haut, c'est-à-dire que l'ensemble moteur-pompe permet de générer une pression supérieure à celle requise pour le fonctionnement des autres composants. La niveau de la branche B est légèrement inférieur, ce qui constitue une marge de sécurité pour limiter l'effort du groupe moteur-pompe (branche A) en deçà du maximum acceptable. En d'autres mots, si le réglage du limiteur de pression correspondait à un niveau supérieur à celui de la branche A, son débit ne pourrait pas passer par le limiteur de pression, ce qui surchargerait ou même bloquerait le moteur d'entraînement.

On peut observer aussi que la pression qui règne dans le système durant la phase illustrée est celle générée par la branche ayant le plus bas niveau, soit C. Dès lors, les branches A et D se vident vers C et font monter le vérin. En effet, au débit de la pompe s'ajoute celui généré par le moteur hydraulique qui est forcé à agir comme une pompe sous l'effet de la charge menante suspendue au treuil. Cette phase prend fin lorsque le vérin atteint la fin de course et qu'il ne peut plus recevoir le débit, ce qui est illustré par la fermeture de la branche C (figure 9). À noter que la pression maximale que cette branche peut générer demeure inchangée ; en revanche, elle peut maintenant résister à une pression théoriquement illimitée.

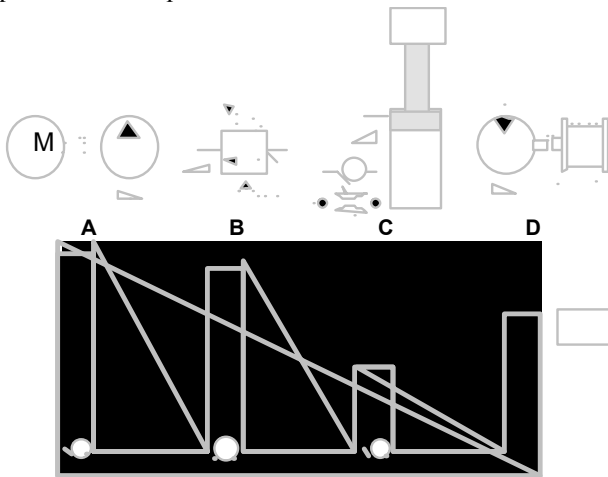


Figure 9

Durant la deuxième phase, la pression du système devient celle générée par la branche D. Celle-ci recevra donc le débit constant venant de la pompe ; le treuil fera monter la charge jusqu'à la butée, ce qui provoquera l'arrêt du moteur hydraulique et la fermeture de la branche D (figure 10). Durant la phase suivante, la pression du système sera celle générée par la branche B ; l'huile coulera désormais indéfiniment par le limiteur de pression.

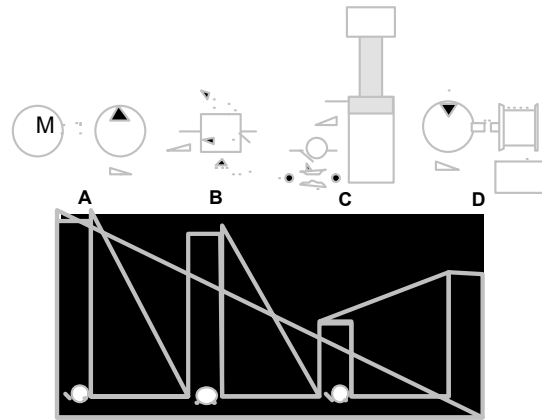


Figure 10

Il est important d'insister sur le fait que, dans tous les cas, les niveaux illustrent la pression maximale que peut éventuellement générer chaque branche. Toutefois, pendant le déroulement de chaque phase, la pression dans le système est celle générée par la branche qui reçoit le débit, soit celle du plus faible niveau. En poursuivant cette approche, nous pouvons aussi tenir compte de situations plus complexes. Ainsi, par exemple, dans la figure 11, la branche C illustre la situation d'un vérin pendant la phase d'accélération d'une masse ; le niveau plus élevé de cette branche indique que le taux d'accélération ne dépend pas du vérin mais de la pression qui règne dans la branche qui reçoit le débit (généralement celle du limiteur de pression). Nous pouvons aussi tenir compte des effets des forces menantes sur un vérin et de sa descente incontrôlée, avec le vide qui en résulte, tel qu'illustré par la branche D. Finalement, la branche E correspond à un accumulateur à gaz : la pression maximale peut atteindre des valeurs extrêmes, ce qui est illustré par la hauteur plus importante de la colonne ; la pression générée ne peut pas être inférieure à celle du gaz de précharge, c'est-à-dire lorsqu'il n'y a pas de liquide ; le "siège" placé à la hauteur de la pression de précharge illustre cette condition, tandis que le "flotteur" indique que l'accumulateur ne fournit plus de débit en bas de ce niveau. Contrairement aux autres composants, le niveau de la branche de l'accumulateur monte à mesure qu'il se remplit, illustrant ainsi l'augmentation de pression.

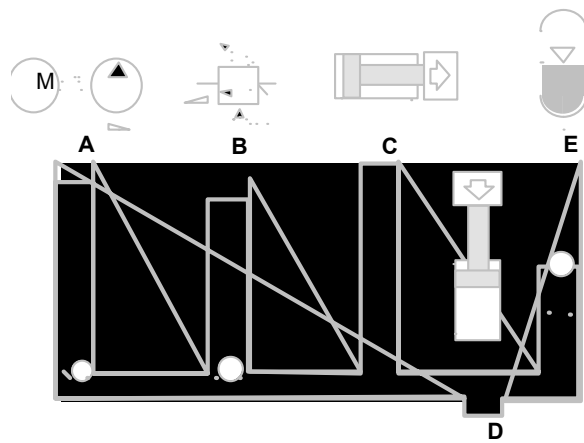


Figure 11

5. Conclusion

Nous pensons que les éléments que nous venons d'exposer peuvent constituer une base autour de laquelle pourrait s'articuler un cadre théorique complet des circuits hydrauliques et pneumatiques, analogue à celui qui existe pour les circuits électriques.

L'élaboration de ce cadre théorique, et son éventuelle validation pédagogique, nous apparaît comme un jalon essentiel et incontournable pour améliorer l'enseignement de cette discipline. Il convient que les étudiants disposent d'un cadre de référence complet et explicite, susceptible de structurer, d'articuler et de rendre cohérente leur démarche d'analyse des systèmes d'énergie des fluides.