

HYDRAULIQUE DIGITALE

Mise en œuvre, avantages et inconvénients

Le principe de l'hydraulique digitale est de faire varier de manière continue la pression ou le débit dans un circuit hydraulique à partir d'une série de valves actionnées en tout ou rien. **Les travaux réalisés par le Cetim ont permis de déterminer dans quelle mesure il est possible de piloter de manière digitale des valves sur différents circuits hydrauliques présentant des fonctions avec des paramètres plus ou moins sensibles tels que le temps de réponse, la précision de contrôle, la stabilité, etc.** Exposés par Etienne Camus, ingénieur Études et Prestations - Hydraulique au sein du pôle Transmission de Puissance du Cetim, ces travaux ont également permis de mettre en avant les gains apportés par cette technologie tout en identifiant les inconvénients dus à l'architecture du circuit choisi, aux composants hydrauliques utilisés et à la commande mise en œuvre.

« Les deux branches fondamentales de l'hydraulique digitale sont les systèmes basés sur la mise en parallèle de composants et les systèmes basés sur les technologies de commutation, explique Etienne Camus, ingénieur Etudes et Prestations - Hydraulique au pôle Transmission de Puissance du Cetim. Les deux peuvent être appliqués de plusieurs façons différentes.

- **PCM (Pulse Code Modulation)**: système de composants connectés en parallèle (module DFCU « Digital Flow Control Unit ») avec une sortie commandée en changeant la combinaison de l'état des composants. Le système comporte un certain nombre de valeurs de sortie discrètes et aucune commutation n'est nécessaire afin de maintenir ces valeurs. Le codage consiste à définir la répartition du débit / de section entre chaque valve. Le codage binaire est la méthode la plus courante avec des capacités d'écoulement qui sont dans des ratios de 1 : 2 : 4 : 8 etc. Elle offre aussi la meilleure résolution par rapport aux autres types de codages.

- **PWM (Pulse Width Modulation)**: système qui repose sur la commutation rapide en continue d'un composant unique (ou d'un faible nombre). La valeur de sortie est réglée par la largeur d'impulsion du signal de commande. Cette technique permet de fournir un signal à partir d'un binaire (1/0). En appliquant ce signal sur une durée donnée, la valeur moyenne sera la même que celle du signal analogique. Le signal discret n'aura que des valeurs logiques (1 ou 0) et une fréquence fixe. La modulation de la moyenne se fait en jouant sur le rapport

cyclique d'ouverture. La moyenne du signal de sortie est égale au rapport cyclique d'ouverture.

La technologie de l'hydraulique digitale concerne l'ensemble de la chaîne de transmission de puissance hydraulique depuis les pompes (conversion mécanique-hydraulique) jusqu'aux actionneurs linéaires (vérins hydrauliques) ou rotatifs (moteurs hydrauliques) en passant par les valves de distribution. Il existe également des accumulateurs hydrauliques utilisant ce principe.

L'étude réalisée par le Cetim est basée sur le fonctionnement de 2 circuits hydrauliques présentant des caractéristiques différentes :

- **Circuit n°1**: un circuit hydraulique permettant le mouvement linéaire d'un vérin à vitesse variable, avec pilotage direct du vérin par le conducteur de la machine. Ce type de circuit nécessite, entre autres, de bonnes précisions de positionnement et de bons temps de réponse.

coef					
1	2	4	8	16	
Valve 1	Valve 2	Valve 3	Valve 4	Valve 5	k
					0
1					1
	1				2
1	1				3
		1			4
1		1			5
	1	1			6
1	1	1			7
			1		8
1			1		9
	1		1		10
1	1		1		11
		1	1		12
1		1	1		13
	1	1	1		14
1	1	1	1		15
				1	16
1				1	17
	1			1	18
1	1			1	19
		1		1	20
1		1		1	21
	1	1		1	22
1	1	1		1	23
			1	1	24
1			1	1	25
	1		1	1	26
1	1		1	1	27
		1	1	1	28
1		1	1	1	29
	1	1	1	1	30
1	1	1	1	1	31

Figure 1 : Table logique du codage en binaire d'un module DFCU à 5 valves.

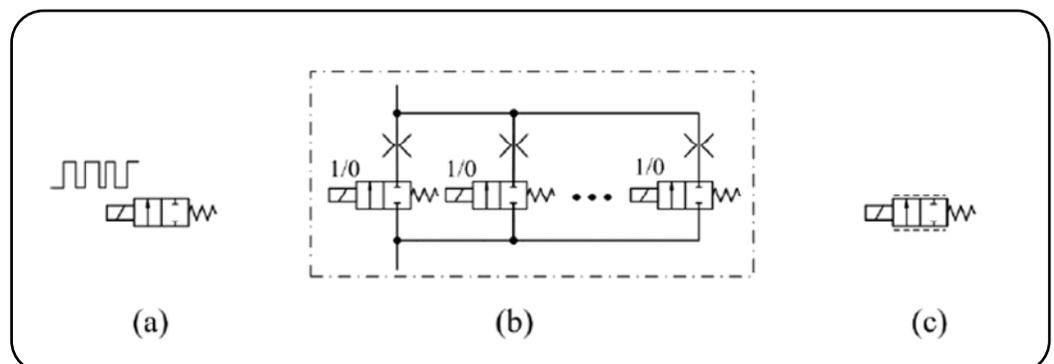
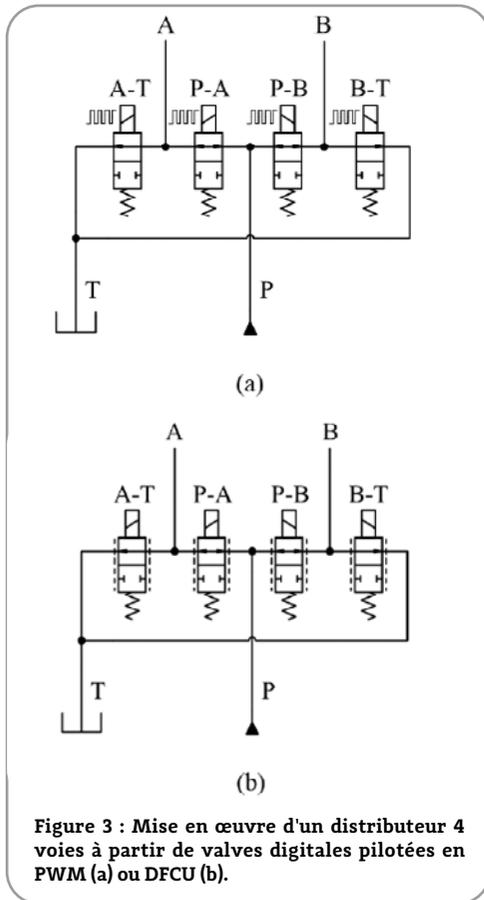


Figure 2 : Valve PWM (a), Valve DFCU (b), Symbole d'un module DFCU (c).

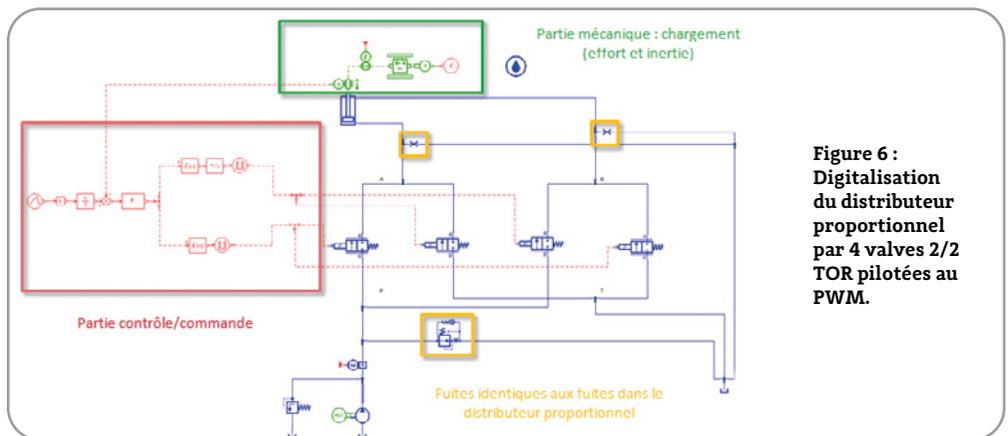
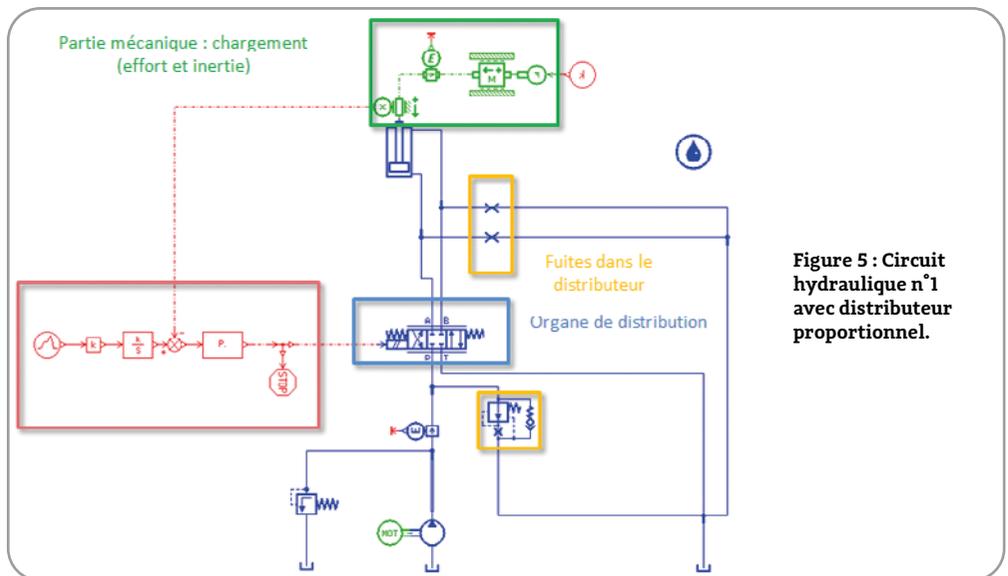
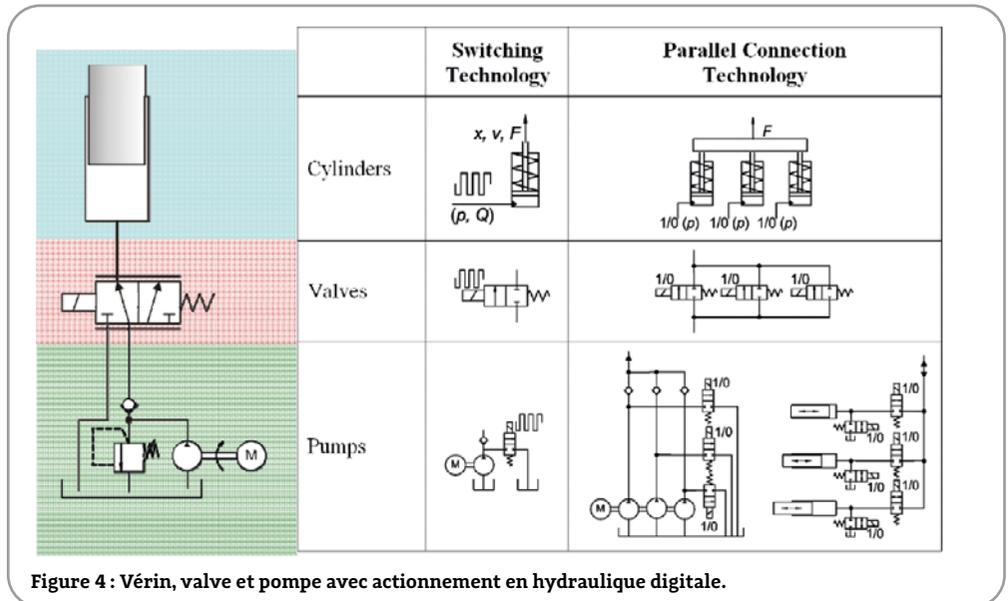


▪ **Circuit n°2** : un circuit hydraulique permettant l'entraînement à vitesse variable d'un ventilateur de refroidissement. Ce type de circuit nécessite des précisions de vitesse de rotation et des temps de réponse moins importants que pour le circuit n°1.

L'ensemble de la démarche se base sur la modélisation des deux circuits hydrauliques afin de pouvoir aisément faire des modifications sur ceux-ci, et sans recourir pour le moment à des essais potentiellement coûteux et nécessitant un délai de mise en œuvre plus important.

Mise en œuvre de l'hydraulique digitale

▪ **Circuit n°1, sans changement d'architecture du circuit hydraulique** : le circuit n°1, permettant le mouvement linéaire d'un vérin à vitesse variable est, dans son architecture hydraulique « classique », constitué d'une pompe à cylindrée fixe ou variable, d'un distributeur à commande proportionnelle et d'un vérin. Le contrôle du vérin est fait directement par le conducteur de la machine qui le pilote via un joystick. Dans un souci de simplification pour ce premier exemple traité, nous avons utilisé une pompe à cylindrée fixe avec un entraînement à vitesse fixe. Sans changer d'architecture hydraulique, « digitaliser » ce circuit consiste à remplacer chaque chemin hydraulique du distributeur proportionnel par une valve 2/2 TOR (Tout Ou Rien) pilotée en PWM, ou par un module DFCU composé de plusieurs valves 2/2 TOR.



▪ **Circuit n°2, avec changement de l'architecture du circuit hydraulique** : le circuit n°2, permettant l'entraînement à vitesse variable d'un ventilateur de refroidissement est, dans son architecture « classique », constitué d'une pompe à cylindrée fixe, d'un limiteur de pression et d'un moteur hydraulique. La vitesse du ventilateur est réglée en boucle ouverte à partir du réglage de la pression maximale en amont du moteur hydraulique, via le limiteur de pression à commande proportionnelle.

En changeant l'architecture hydraulique du circuit, il est possible de « digitaliser » la distribution (comme pour le circuit n°1), mais il est également possible de digitaliser la pompe. Une pompe digitale est une pompe à cylindrée fixe pour laquelle le débit est envoyé vers le système ou vers le réservoir à travers une valve tout ou rien. La mise en série de pompes digitales permet d'avoir un équivalent d'une pompe à cylindrée variable, où plus ou moins de débit est envoyé dans le système en contrôlant les valves tout ou rien.

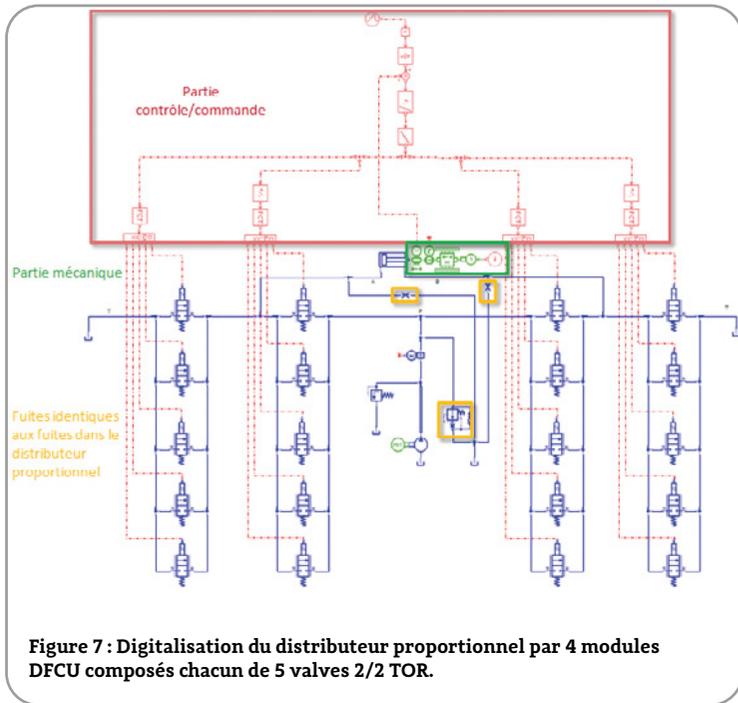


Figure 7 : Digitalisation du distributeur proportionnel par 4 modules DFCU composés chacun de 5 valves 2/2 TOR.

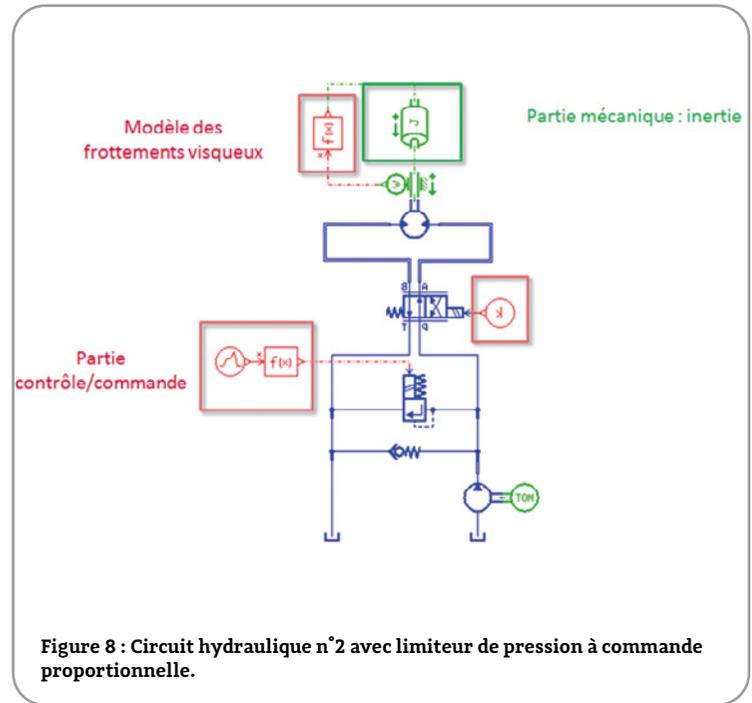


Figure 8 : Circuit hydraulique n°2 avec limiteur de pression à commande proportionnelle.

La variation du débit est faite de façon discrète et dépend du codage fait sur les cylindrées des pompes digitales. La méthode déployée dans cette étude consiste, pour les deux circuits étudiés, à vérifier les performances obtenues avec les circuits digitalisés, mais aussi à étudier l'aspect énergétique et à observer et analyser les pulsations de pression liées aux commutations rapides des valves TOR.

Résultats obtenus par simulation

- **Aspects fonctionnels :** les résultats sur le circuit n°1, aussi bien piloté en PWM qu'en DFCU, permettent d'obtenir des performances de positionnement comparables à celles observées avec un distributeur à commande proportionnelle. Ainsi, même sur un circuit hydraulique pour lequel les performances dynamiques attendues sont exigeantes,

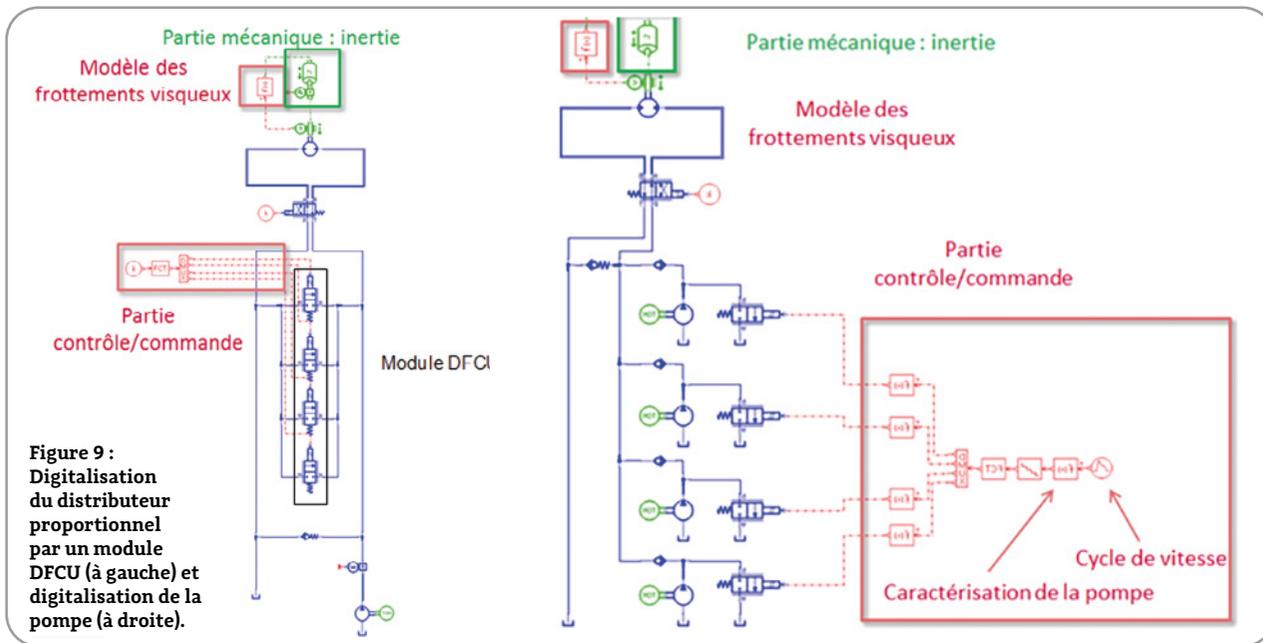


Figure 9 : Digitalisation du distributeur proportionnel par un module DFCU (à gauche) et digitalisation de la pompe (à droite).

de valves ON/OFF. La distribution en DFCU reste la plus concernée par les problèmes de dispersion en temps de réponse entre les valves, mais offre la possibilité de fonctionnement même dans le cas où une des valves ON/OFF devient défaillante.

• Aspects énergétiques :

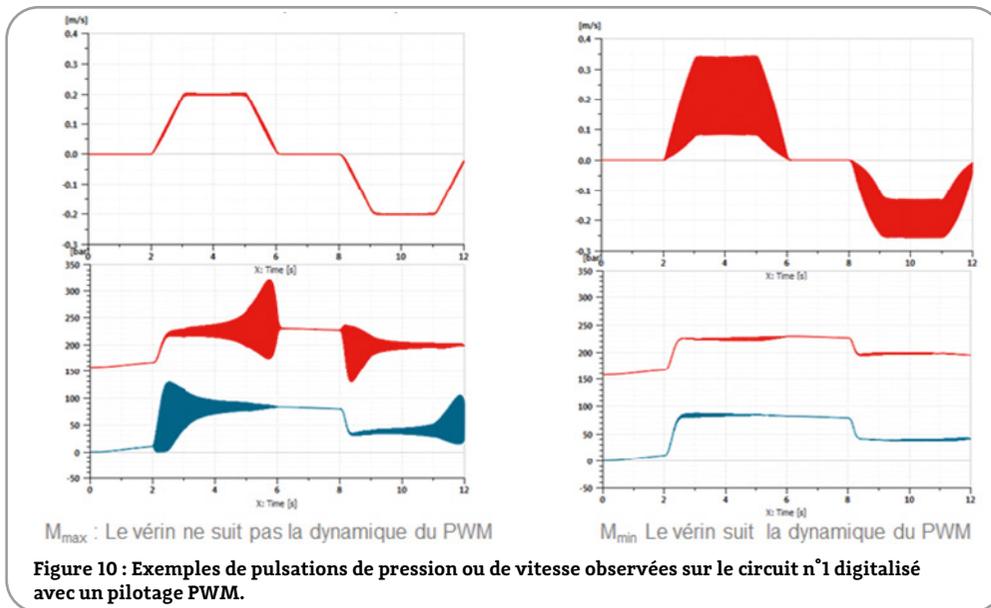


Figure 10 : Exemples de pulsations de pression ou de vitesse observées sur le circuit n°1 digitalisé avec un pilotage PWM.

du point de vue énergétique, la digitalisation du circuit n°1 sans changement d'architecture hydraulique ne permet pas de réels gains énergétiques. En effet, sans changement d'architecture, seuls les éventuelles pertes intrinsèques aux composants de distribution hydraulique entrent en jeu (pertes de charge et fuites) et ne sont pas prépondérants dans ce type de circuit où la pompe fonctionne à débit et pression constants.

En revanche, les changements d'architectures hydrauliques sur le circuit n°2 permettent, eux, des gains énergétiques importants par rapport au circuit à limiteur de pression proportionnel. En effet, dans ce cas, les changements d'architectures hydrauliques pilotées en digital permettent de n'envoyer dans le circuit hydraulique que le débit nécessaire. Cette solution se rapproche alors fortement de l'utilisation d'une pompe à cylindrée variable, solution souvent plus encombrante et plus coûteuse.

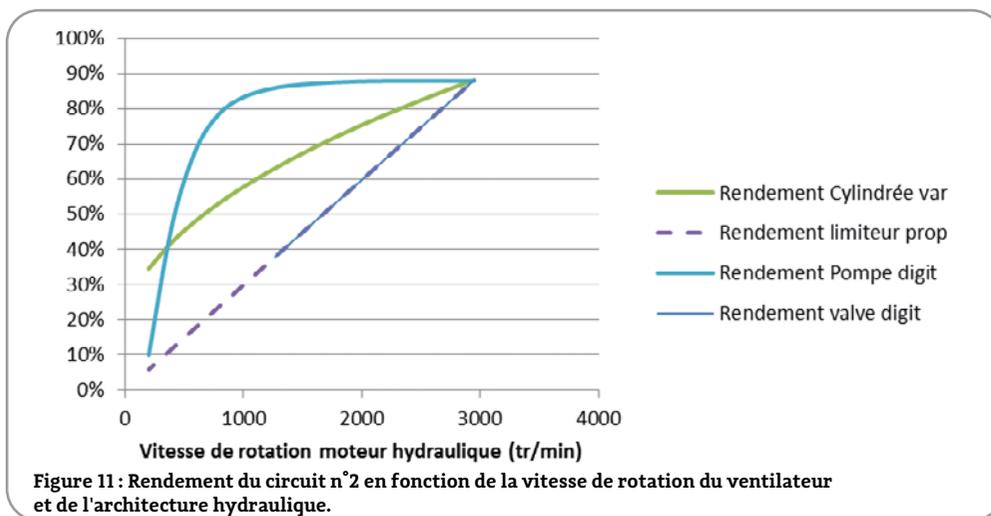


Figure 11 : Rendement du circuit n°2 en fonction de la vitesse de rotation du ventilateur et de l'architecture hydraulique.

Conclusions

Les deux cas d'étude explorés ont permis de se confronter, grâce à la modélisation système, aux possibilités et problématiques engendrées par l'utilisation de l'hydraulique digitale. Il en ressort principalement que, contrairement à ce qui pouvait éventuellement transparaître avant cette étude, la partie commande reste relativement simple à mettre en œuvre pour piloter cette technologie. En revanche, il est également clairement apparu qu'un pilotage de valves tout ou rien était fort susceptible de provoquer des pulsations de pression (parfois très importantes) dans les circuits hydrauliques. Enfin, les modifications d'architectures des circuits hydrauliques, rendues possibles par la technologie hydraulique digitale, permettent des gains énergétiques substantiels par rapport aux architectures hydrauliques classiques basées sur le pilotage de composants hydrauliques proportionnels. ■

la technologie « hydraulique digitale » permet de répondre au besoin. En revanche, en fonction des conditions de chargement (masse, effort), il apparaît des pulsations sur les courbes de vitesse ou de pression. Celles-ci sont dues à la commande qui génère des à-coups de débit lors des ouvertures / fermetures des valves TOR. En termes de comparaison entre la digitalisation PWM et DFCU, l'architecture en PWM

permet d'avoir un nombre beaucoup moins important de valves, mais nécessite une grande dynamique et un faible temps de réponse pour suivre la commande. Les valves utilisées en PWM doivent également avoir une endurance importante car constamment sollicitées. Les modules DFCU sont capables de fournir un débit plus important tout en ayant de plus petites valves qu'en PWM grâce à la mise en parallèle