

# Démarrreur ou variateur ?

Avantages comparés des démarreurs progressifs et des variateurs de fréquence pour la commande des pompes centrifuges

JUAN SAGARDUY, JESPER KRISTENSSON, SÖREN KLING, JOHAN REES – Dans les applications de pompage d'eau, les moteurs asynchrones d'entraînement des pompes centrifuges sont directement branchés sur le réseau électrique et les débits sont le plus souvent régulés par une vanne placée sur le refoulement, méthode au piètre bilan énergétique du fait de pertes de charge considérables. En modulant la vitesse de rotation du moteur, un variateur de fréquence régule les débits et économise l'énergie. Autre solution : installer un démarreur progressif qui démarre et arrête la pompe en fonction des besoins réels. De cette manière, elle ne tourne plus en continu mais uniquement pour pomper les volumes d'eau requis et est arrêtée le reste du temps. Variateur de fréquence ou démarreur progressif : laquelle de ces deux technologies procure les meilleures économies d'énergie et le temps de retour sur investissement le plus court ? Dans certaines applications de pompes en parallèle, la solution optimale combine les deux technologies.





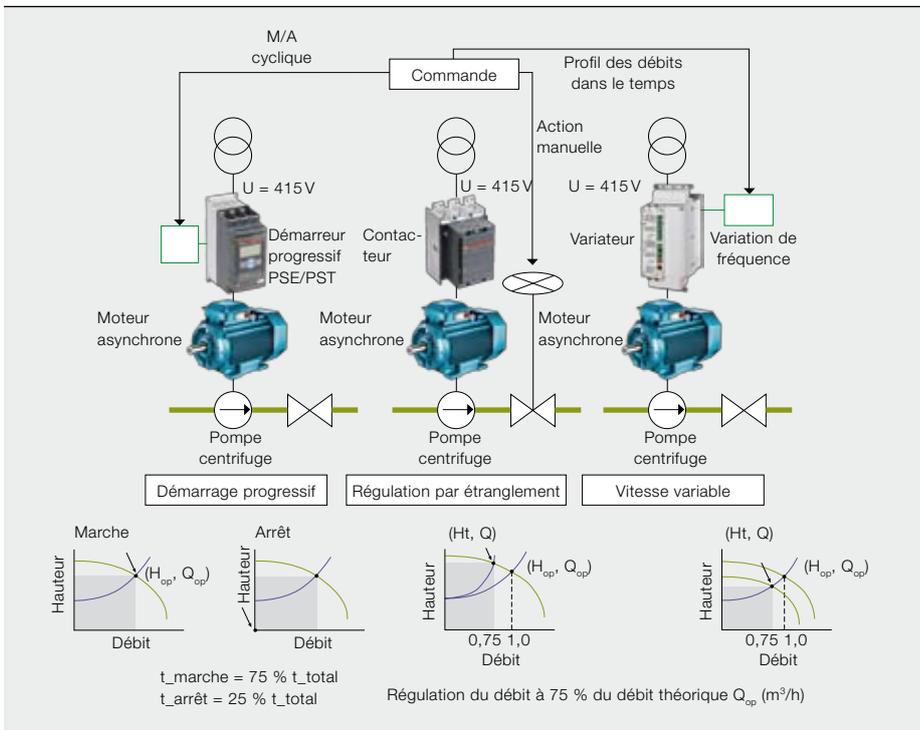
$H_{bep}$ [m]	Charge hydraulique au point de rendement maximal de la pompe centrifuge
$Q_{bep}$ [m <sup>3</sup> /s]	Débit au point de rendement maximal de la pompe
$H_{st}$ [m]	Hauteur d'élévation totale (distance verticale d'élévation de l'eau pompée). Dans le cas d'un pompage d'eau dans un puits, elle correspond à la distance entre le niveau de l'eau à pomper et le niveau du sol plus la distance verticale entre le niveau du sol et le point de refoulement. Dans le cas d'un plan d'eau en plein air, il s'agit de la distance verticale totale entre la surface de l'eau et le point de refoulement.
$Q_{op}$ [m <sup>3</sup> /s]	Débit théorique du réseau. En pratique, il est déterminé pour les pointes de débit occasionnelles (survenant pendant environ 5% du temps de fonctionnement des stations d'épuration).
$H_{op}$ [m]	Charge hydraulique théorique
$H_{op,id}$ [m]	Charge hydraulique théorique d'un réseau idéal
$H_t$ [m]	Charge hydraulique associée à un débit générique Q [m <sup>3</sup> /s] d'une pompe tournant à vitesse constante (régulation des débits par étranglement)
$H_d$ [m]	Charge hydraulique associée à un débit générique Q [m <sup>3</sup> /s] d'une pompe commandée en vitesse variable (régulation électronique des débits)
$H_{max}$ [m]	Hauteur maximale d'élévation du liquide par une pompe donnée
$Q_{max}$ [m <sup>3</sup> /s]	Débit maximal d'une pompe donnée

1 Trois modes de commande des pompes et de régulation des débits

L'efficacité énergétique d'un produit ou d'un système oriente de plus en plus le choix des clients. Les constructeurs d'équipements électriques ne ménagent donc pas leur peine pour améliorer cet aspect de leur offre, d'autant que les clients veulent que l'argent investi et le coût de l'immobilisation de l'outil de production pendant l'installation et la mise en service de ces équipements soient compensés par les économies d'énergie réalisées.

L'engagement d'ABB en faveur de l'efficacité énergétique est incontestable et le Groupe consacre du temps, du savoir-faire et des ressources pour offrir les meilleurs produits basse tension (BT) du marché. Il a ainsi développé des variateurs de fréquence et des démarreurs progressifs<sup>1</sup> qui maximisent les économies d'énergie dans les applications de pompage d'eau et d'eaux usées.

Face à l'inefficacité de la régulation mécanique des débits par vannage (encore appelée étranglement), quelle solution



électronique, variateur de fréquence ou démarreur progressif, allège le plus la facture énergétique ? → 1 En réalité, c'est la nature du réseau hydraulique à pompe centrifuge qui est le facteur déterminant du choix de la solution.

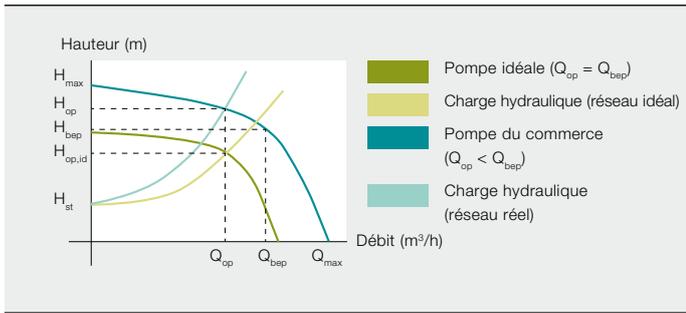
Dans les installations de traitement des eaux usées, par exemple, la commande marche/arrêt (M/A) des pompes centrifuges est en général dictée par les besoins applicatifs. Les eaux résiduelles (effluents issus des bâtiments résidentiels ou tertiaires) sont le plus souvent collectées dans des fosses septiques ou des égouts avant d'être pompées dans des stations d'épuration [1]. Le démarrage progressif des pompes → 2 réduit considérablement

2 Démarreur progressif PSE d'ABB pour applications de pompage



**Note**  
 1 En modulant la tension appliquée, un démarreur progressif démarre le moteur sans à-coups. Lors de l'arrêt de la pompe, un algorithme spécifique contrôle la réduction du couple pour éviter les coups de bélier dans la tuyauterie.

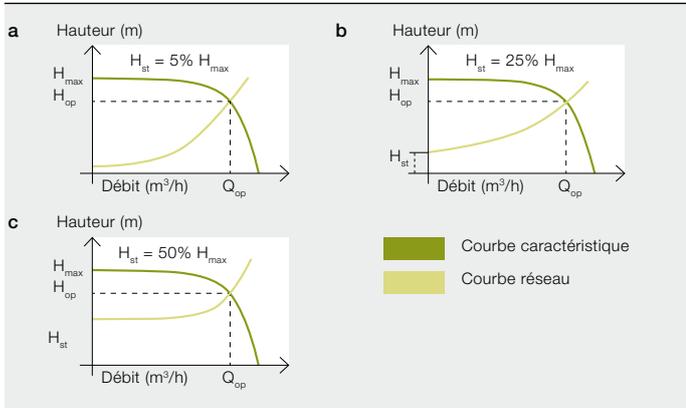
### 3a Sélection de la pompe pour une installation industrielle



### 4 Caractéristiques techniques des 2 pompes étudiées

Fabrication	Puissance (kW)	$H_{max}$ (m)	$H_{bep}$ (m)	$Q_{bep}$ (m³/h)	$\eta_{max}$ (%)
Aurora	90	43,6	27,6	575	74,8
Aurora	350	52,7	33,8	2 500	84,5

### 5 Réseaux hydrauliques sélectionnés pour analyser le potentiel d'économies d'énergie



- a Pertes de charge linéaires élevées
- b Réseau mixte
- c Hauteur d'élévation importante

les risques d'engorgement de ces dernières par les boues contenues dans l'eau. En général, leur commande M/A cyclique constitue une alternative attrayante à leur commande en vitesse variable malgré l'impossibilité d'agir sur les débits. En d'autres termes, un démarreur progressif est perçu comme une solution satisfaisante et économique qui atténue les contraintes électriques, les chocs mécaniques et les vibrations imposés au moteur lors de son démarrage et évite les à-coups de pression (coups de bélier) dans la tuyauterie lors de l'arrêt de la pompe. Qui plus est, le moteur fonctionne à son point de rendement maximal et est arrêté le reste du temps.

Nous nous proposons d'analyser et de comparer les économies d'énergie et le temps de retour sur investissement des deux solutions électroniques pour deux

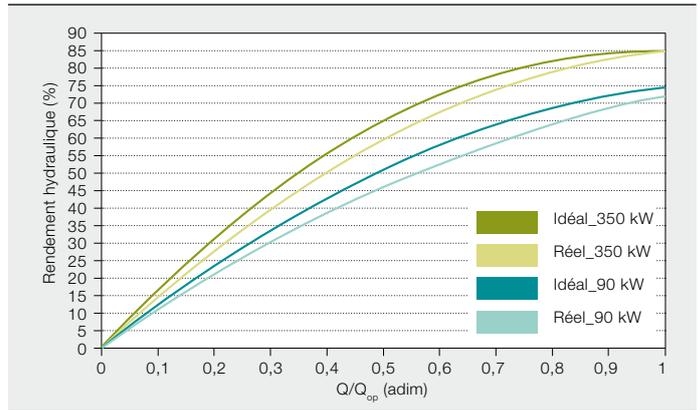
groupes de pompage centrifuge (90 kW et 350 kW).

#### Groupe de pompage type

Lors de la spécification d'un groupe de pompage, le débit visé  $Q_{op}$  [m³/h] doit être garanti. Dans l'idéal, le débit  $Q_{bep}$  [m³/h] de la pompe choisie doit coïncider avec  $Q_{op}$ . Or, dans la réalité, on surdimensionne la pompe → 3a qui fonctionne avec un rendement hydraulique réduit dans la majeure partie de sa plage de débit. Ce point est démontré en → 3b pour deux pompes centrifuges de fabrication Aurora d'une puissance nominale respective de 90 kW et 350 kW → 4 [2].

Pour analyser le potentiel d'économies d'énergie de ces pompes, trois réseaux hydrauliques différents ont été utilisés : réseau à pertes de charge linéaires élevées (rapport [v] de la hauteur d'éléva-

### 3b Chute de rendement hydraulique dans les pompes de 90 kW et 350 kW du fait d'un surdimensionnement de 15%



### 6 Variation du rendement électrique (%) dans un dispositif électronique (démarreur progressif et variateur) avec charge hydraulique

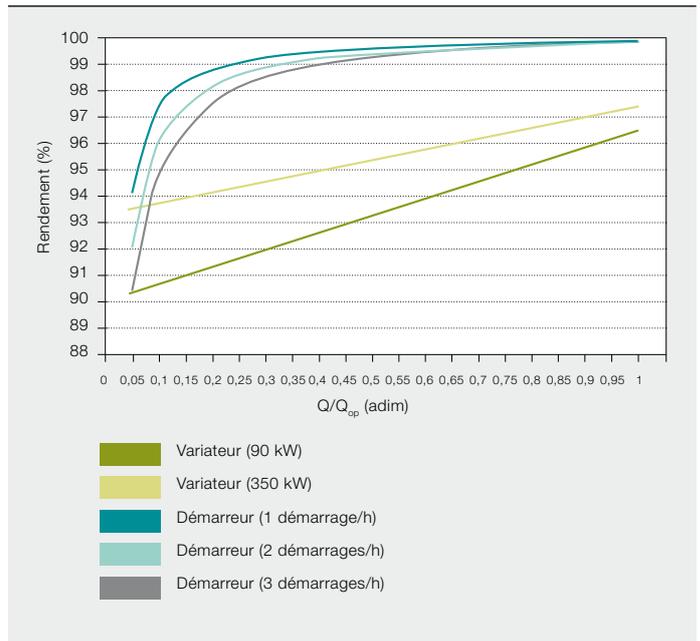
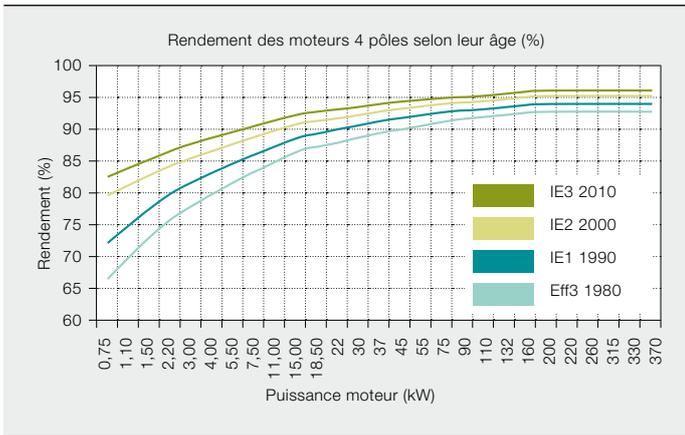
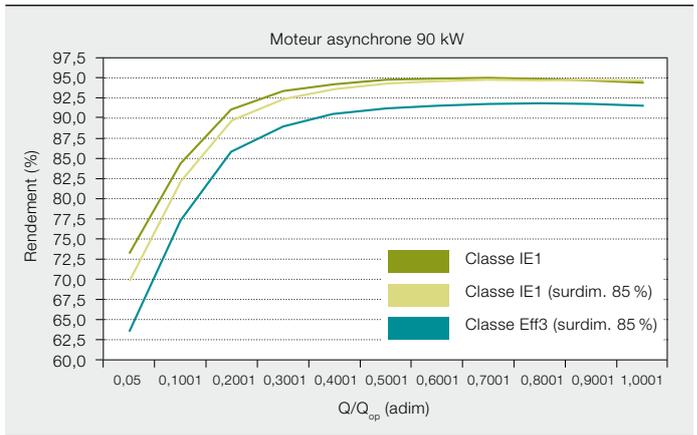


ABB investit du temps, du savoir-faire et des ressources pour offrir les meilleurs produits BT du marché, aptes à maximiser les économies d'énergie dans les applications de pompage d'eau et d'eaux usées.

## 7a Impact de la classe de rendement du moteur [4]



## 7b Variation du rendement du moteur selon la charge hydraulique



## 8 Incidence de différents facteurs sur la consommation électrique (Pn = 90 kW – fréquence de commutation 4 kHz)

Facteurs de chute de rendement (%)	Charge (%)				
	5 %	25 %	50 %	75 %	100 %
1 – Surdimensionnement de la pompe (15 %)	-1,3	-3,8	-6,0	-4,5	-2,1
2 – Surdimensionnement du moteur (15 %)	-3,2	-1,2	-0,4	-3,0	0,2
3 – Classe de rendement du moteur (Eff3)	-9,5	-3,4	-3,0	-3,0	-3,0
4 – Pertes harmoniques	-7,0	-2,1	-2,4	-1,9	-1,3
Augmentation de la consommation électrique (%)	26,5	11,7	13,3	10,3	6,6

tion  $H_{st}$  [m] sur la charge hydraulique maxi  $H_{max}$  [m] = 5 %), réseau à hauteur d'élévation importante ( $v = 50\%$ ) et réseau mixte ( $v = 25\%$ ) → 5.

### Performances du variateur, du démarreur et du moteur

Les variateurs de fréquence affichent un rendement élevé ( $\eta_{var}$ ) qui chute naturellement lorsque la puissance utile diminue par rapport à la valeur nominale. Le rendement des démarreurs progressifs atteint pratiquement 100 % lorsque le contacteur de bypass du moteur est activé. Leur rendement baisse de manière sensible avec le nombre de démarrages par heure et des intervalles de fonctionnement plus courts du fait des pertes par effet Joule supplémentaires pendant le démarrage et l'arrêt du moteur → 6.

Les normes actuelles imposent aux moteurs des valeurs de rendement élevées (classes de rendement CEI), en général supérieures à 90 %, pour les charges [3, 4] → 7a et → 7b. Ces rendements (qui varient fortement selon la classe) sont affectés par l'utilisation d'un variateur de fréquence ou d'un démarreur progressif. Ils diminuent lorsque les moteurs sont alimentés par des variateurs à commutation rapide, du fait des harmoniques de courant et de tension,

mais ne sont pas modifiés lorsque le contacteur de bypass du moteur prend le relais une fois le moteur lancé en raison de la tension sinusoïdale pure.

L'investissement initial total correspond au coût d'achat du variateur ou du démarreur plus un pourcentage du coût global pour couvrir les arrêts de production.

L'impact du surdimensionnement du réseau, de la classe de rendement du moteur et des pertes harmoniques (commande en vitesse variable) dans une installation réelle est donné en → 8.

### Économies d'énergie

Les graphiques → 9a et → 9b comparent les économies d'énergie procurées par la commande en vitesse variable et le

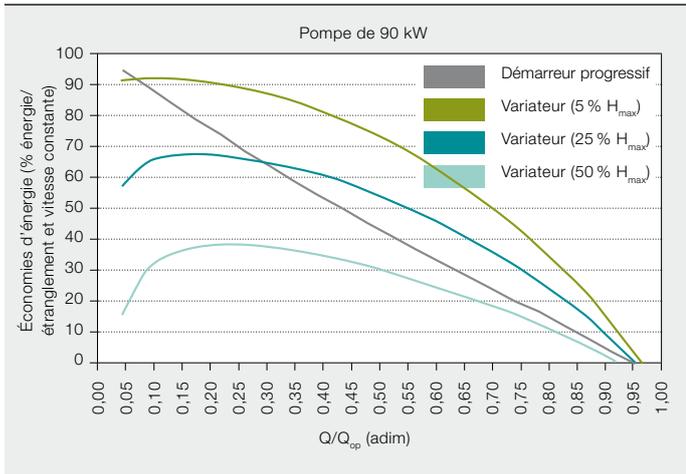
démarrage progressif de deux groupes de pompage (90 kW et 350 kW). Dans les réseaux à pertes de charge linéaires élevées ( $v = 5\%$ ), la variation de vitesse induit plus d'économies d'énergie dans quasiment toute la plage de fonctionnement (7 à 98 %) pour les deux groupes de pompage. Par contre, dans un groupe de 90 kW caractérisé par une hauteur d'élévation importante ( $v = 50\%$ ), le démarrage progressif est une meilleure solution pour tous les points de fonctionnement alors que pour le groupe de 350 kW, le variateur de fréquence garantit des économies d'énergie légèrement supérieures mais seulement entre 75 et 92 % de débit de pompage. Enfin, dans un réseau hydraulique mixte ( $v = 25\%$ ), le variateur de fréquence est plus avantageux économiquement à des débits de pompage au-dessus de 28 % (90 kW) et de 24 % (350 kW). En fait, la variation de vitesse offre les meilleurs gains entre 15 et 20 % de débit de pompage.

Contrairement aux variateurs de fréquence (caractérisés par des pertes dans les semi-conducteurs à charge nominale), les démarreurs progressifs fonctionnent à charge nominale lorsque le contacteur de bypass est activé → 9c. Aucune perte supplémentaire n'intervient dans leurs thyristors. Les conditions d'exploitation et les spécifications de l'installation qui tirent le meilleur parti des démarreurs progressifs ou des variateurs de fréquence pour la régulation des débits de pompage sont illustrées en → 10<sup>2</sup>.

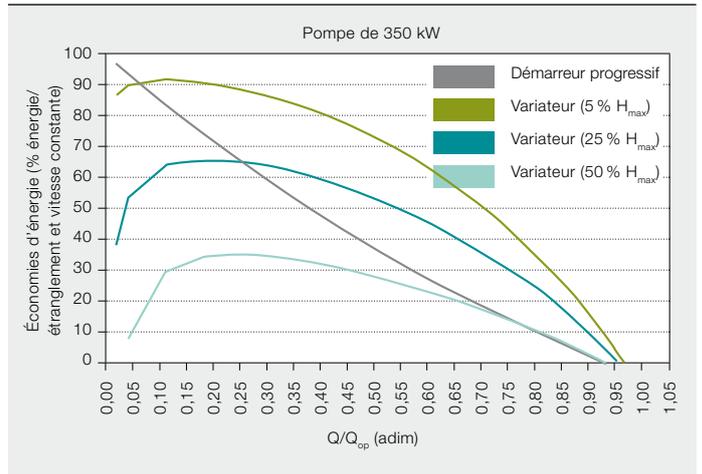
### Note

2 Conversion des économies d'énergie en % (comparées à un moteur tournant à vitesse constante avec débits régulés par étranglement) en avantages économiques sur la base d'une pompe fonctionnant 8760 h/an (365 x 24) et d'un kW facturé 0,065 dollar [5].

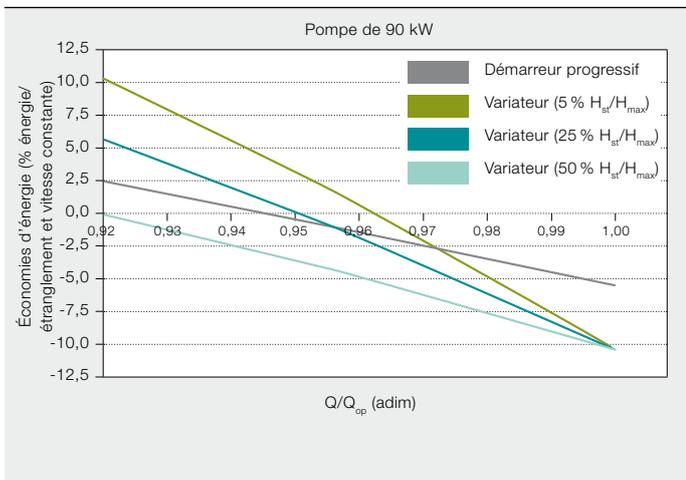
9a Économies d'énergie (%) procurées par la vitesse variable et le démarrage progressif dans un groupe de pompage de 90 kW.



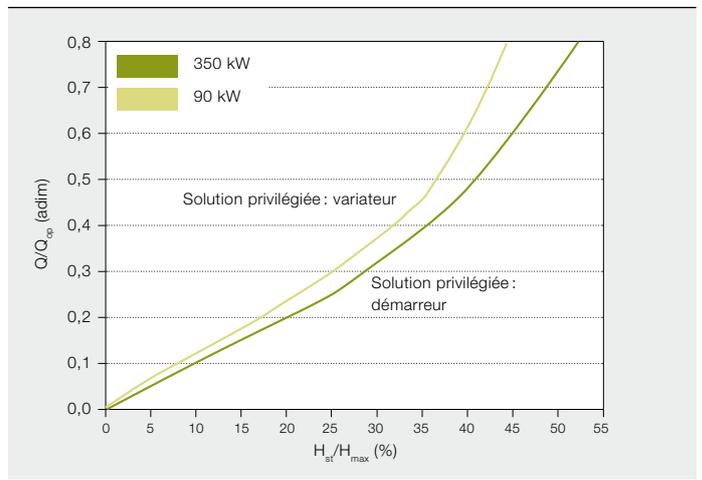
9b Économies d'énergie (%) procurées par la vitesse variable et le démarrage progressif dans un groupe de pompage de 350 kW.



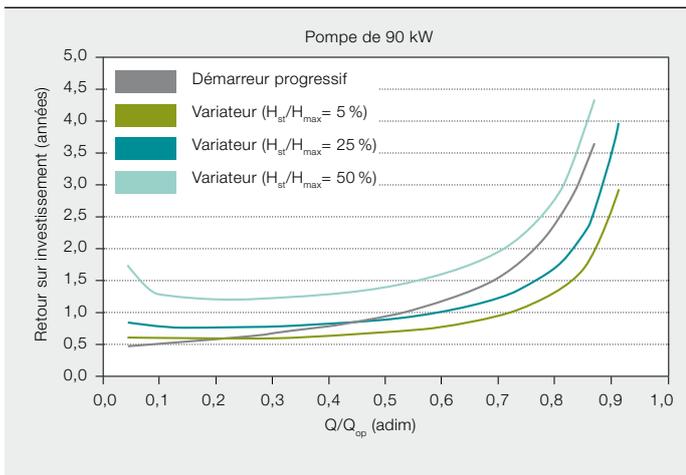
9c Rendement optimal de la pompe de 90 kW du fait du bypass du démarreur progressif aux charges élevées (90% - 100% du débit théorique)



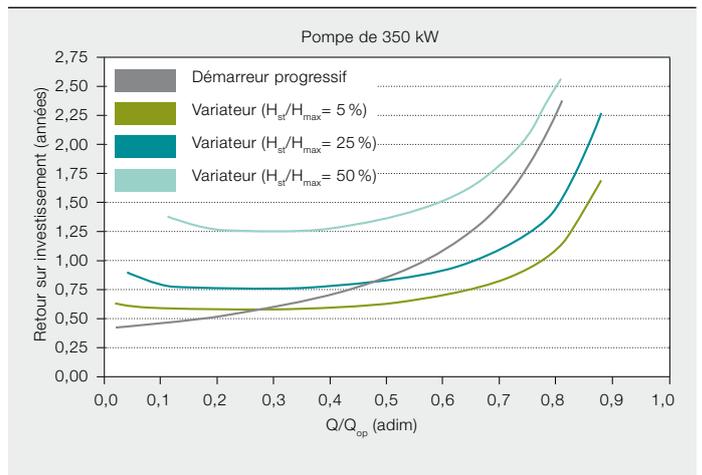
10 Point où le démarrage progressif devient plus avantageux que la variation de vitesse.



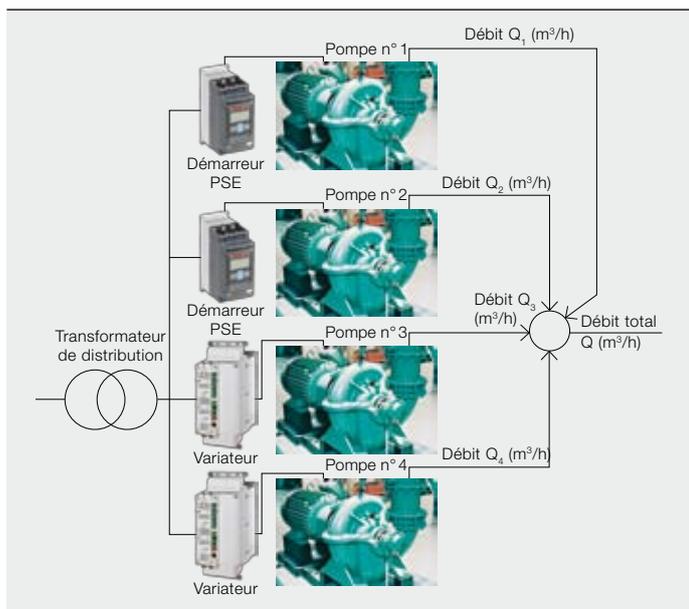
11a Temps de retour sur investissement des solutions à variateur de vitesse et démarreur progressif pour la pompe de 90 kW



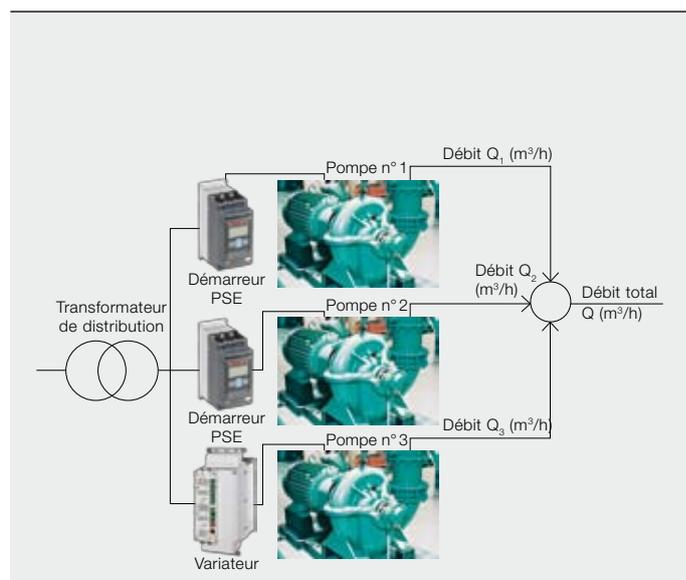
11b Temps de retour sur investissement des solutions à variateur de vitesse et démarreur progressif pour la pompe de 350 kW



**12 Solution électronique préconisée pour une installation à 4 pompes en parallèle (réseau à pertes de charge linéaires élevées).**



**14 Solution électronique préconisée pour une installation à 3 pompes en parallèle (réseau à hauteur d'élévation/pertes de charge linéaires importantes).**



**13 Solution de régulation des débits dans une installation à 4 pompes en parallèle (réseau à pertes de charge linéaires élevées)**

	Pompe 1	Pompe 2	Pompe 3	Pompe 4
<b>Commande</b>	Démarreur progressif	Démarreur progressif	Variateur de fréquence	Variateur de fréquence
<b>Régulation des débits</b>	Commande cyclique	Commande cyclique	Commande en vitesse variable	Commande en vitesse variable
<b>Débit Q (m³/h)</b>				
0–1 130	M/A (0–22,5 %)	M/A (0–22,5 %)	Arrêt	Arrêt
1 130–2 500	Arrêt	Arrêt	Marche (22,5–50 % Pn)	Marche (22,5–50 % Pn)
2 500–4 740	M/A (27,5–45 %)	M/A (27,5–45 %)	Marche (22,5–50 % Pn)	Marche (22,5–50 % Pn)
4 740–5 790	M/A (60 %)	M/A (60 %)	Marche (35–85 % Pn)	Marche (35–85 % Pn)
5 790–8 000	M/A (75 %)	M/A (75 %)	Marche (70–85 % Pn)	Marche (70–85 % Pn)
8 000–10 000	Bypass	Bypass	Marche (60–100 % Pn)	Marche (60–100 % Pn)
> 10 000	Bypass	Bypass	Marche (> 100 % Pn)	Marche (> 100 % Pn)

**Retour sur investissement**

Inévitablement, les clients désirent savoir en combien de temps ils pourront rentabiliser leur investissement, y compris le manque à gagner résultant des arrêts de production pour installer et mettre en service le variateur de fréquence ou le démarreur progressif.

Pour des pompes de 25 kW environ, le coût d'achat d'un variateur de fréquence représente trois fois celui d'un démarreur progressif et cinq fois dans le cas des pompes de 350 kW [6]. Pour chaque solution technologique, l'investissement initial total correspond au coût d'achat du variateur ou du démarreur plus un pourcentage du coût global pour couvrir les arrêts de production [7]. Dans le cas

des deux appareils électroniques, une valeur de 7,5 % est appliquée.

Le coût des différents composants peut varier pour plusieurs raisons. Les variateurs de fréquence BT fonctionnent en continu et non en mode M/A, et offrent des fonctionnalités plus avancées. Toutefois, ils utilisent des transistors bipolaires à grille isolée (IGBT) et nécessitent donc un circuit de refroidissement adéquat, ce qui renchérit leur coût comparé aux démarreurs progressifs de puissance nominale identique. Ces derniers ont l'avantage de ne fonctionner que sur des périodes très courtes (15 s maxi), d'intégrer des thyristors robustes et économiques, et d'être refroidis par convection naturelle.

Les courbes de temps de retour sur investissement des deux technologies figurent en → 11a et → 11b pour les pompes de 90 kW et 350 kW, et pour les trois réseaux hydrauliques retenus.

**Solutions pour pompes en parallèle**

Dans de nombreuses installations de pompage, les économies d'énergie sont optimisées avec un bon retour sur investissement en utilisant des pompes en parallèle<sup>3</sup> commandées par une combinaison de variateurs de fréquence et de démarreurs progressifs.

Dans un réseau à fortes pertes de charge linéaires, par exemple, la solution préconisée pour une installation de 4 pompes en parallèle d'une puissance unitaire de 350 kW (2 500 m³/h) combine 2 variateurs et 2 démarreurs → 12. La configuration optimale en termes de rentabilité et de performances fonctionnelles est la suivante : pompes 1 et 2 commandées chacune par un démarreur progressif et pompes 3 et 4 par un variateur → 13. Les premières sont directement alimentées par le réseau électrique lorsqu'elles sont à leur puissance maximale. En augmen-

**Note**

<sup>3</sup> Pour une régulation optimale des débits dans ce type d'installation, seule une pompe fonctionne jusqu'à une valeur de débit fixée. Au-delà, une deuxième pompe se met en route avec équilibrage de la charge hydraulique entre les deux pompes [8]. Si les besoins de débit continuent d'augmenter, une troisième pompe est démarrée et ainsi de suite.

## 15 Solution de régulation des débits dans une installation à 3 pompes en parallèle (réseau mixte)

	Pompe 1	Pompe 2	Pompe 3
<b>Commande</b>	Démarrateur progressif	Démarrateur progressif	Variateur de fréquence
<b>Régulation des débits</b>	Commande cyclique	Commande cyclique	Commande en vitesse variable
<b>Débit Q (m³/h)</b>			
0–2500	M/A (0–50%)	M/A (0–50%)	Arrêt
2500–4500	M/A (30–60%)	M/A (30–60%)	Marche (40–60% Pn)
4500–5760	M/A (60–75%)	M/A (60–75%)	Marche (60–80% Pn)
5760–6630	Bypass	M/A (75%)	Marche (55–90% Pn)
6630–7500	Bypass	Bypass	Marche (35–100% Pn)
> 7500	Bypass	Bypass	Marche (> 100% Pn)

## 17 Groupe de pompage d'une installation de traitement d'eau



Avec un savoir-faire reconnu et une offre BT étoffée, ABB réaffirme son engagement en faveur de l'efficacité énergétique avec des produits qui constituent des leviers de valeur pour les clients.

### Juan Sagarduy

ABB Corporate Research

Västerås (Suède)

juan.sagarduy@se.abb.com

### Jesper Kristensson

Sören Kling

Johan Rees

ABB Cewe Control

Västerås (Suède)

jesper.kristensson@se.abb.com

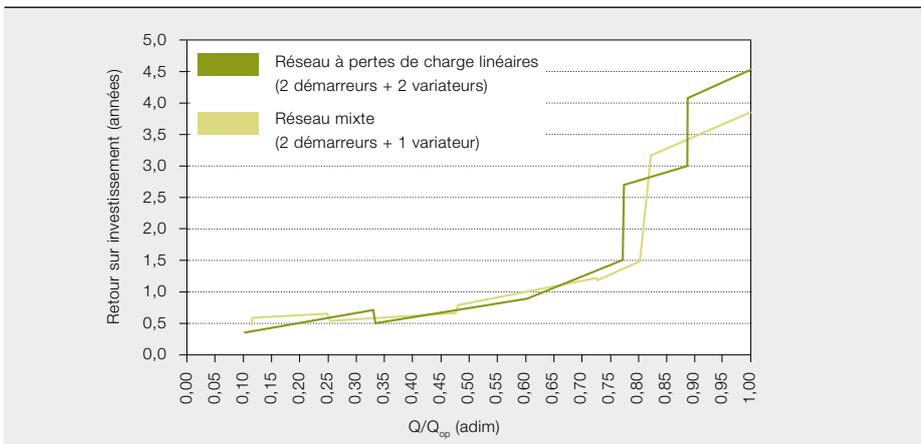
soren.kling@se.abb.com

johan.rees@se.abb.com

### Bibliographie

- [1] ITT Industries, *ITT's Place in the cycle of water: Everything but the pipes*, 2007.
- [2] Aurora Pump (Pentair Pump Group), États-Unis, juin 1994.
- [3] CEI 60034-31, Machines électriques tournantes – Partie 31 : Choix des moteurs éco-énergétiques incluant les applications à vitesse variable – Guide d'application, 2009.
- [4] Brunner, C. U., « Efficiency classes: Electric motors and systems », *Motor energy performance standards event*, Sydney, Australie, 4–5 février 2009. www.motorsystems.org.
- [5] Ministère américain de l'énergie (DOE), Agence internationale de l'Énergie (AIE) Prix de détail moyen de l'électricité aux clients ultimes.
- [6] Sagarduy, J., « Economic evaluation of reduced voltage starting methods », SECRC/PT-RM10/017, janvier 2010.
- [7] Hydraulic Institute, *Pumps & Systems, Understanding pump system fundamentals for energy efficiency. Calculating cost of ownership*, août 2008.
- [8] ITT Flygt, *Cirkulationspumpar med vät motor för värmesystem i kommersiella byggnader*, 2006.
- [9] Vogelesang, H., « Energy efficiency. Two approaches to capacity control », *World Pumps Magazine*, avril 2009.

## 16 Temps de retour sur investissement estimé pour 2 installations constituées de pompes en parallèle et des 2 solutions de commande



tant la vitesse de rotation des moteurs dans une plage prédéfinie (> 50 Hz), les pompes commandées par les variateurs peuvent fournir le surplus de débit occasionnellement requis.

Dans un réseau hydraulique mixte, la configuration optimale selon les mêmes critères comprend 3 pompes, les 2 premières commandées par des démarrateurs progressifs et la troisième par un variateur → 14 et → 15.

Pour les deux exemples, l'investissement initial dans les appareils électroniques est rentabilisé en moins d'un an et demi pour autant que le débit régulé est inférieur à 80 % du débit total → 16.

### La meilleure solution ?

Les résultats de notre analyse comparative montrent que la vitesse variable est idéale pour les réseaux hydrauliques à fortes pertes de charge linéaires (transfert de fluide sans différence de hauteur), alors que le démarrage progressif est préconisé pour les réseaux à hauteur d'élévation importante dans le domaine

de la basse tension. Le recours à la vitesse variable pour les réseaux aux courbes caractéristiques et aux profils de charge très plats doit être évité du fait du risque d'instabilité et de détérioration des pompes [9].

Les démarrateurs progressifs constituent une solution technique très compétitive, tout spécialement pour les applications de pompage d'eau et d'eaux usées où les pompes sont régulièrement démarrées et arrêtées pour vider un réservoir et transférer un fluide vers une unité de traitement. Il s'agit d'appareils robustes offrant de bonnes fonctionnalités de bypass et dotés d'algorithmes de commande spécifiques pour des séquences de démarrage (surcouple) et d'arrêt (sans coups de bélier). Pour autant, les économies d'énergie et le retour sur investissement sont optimisés dans de nombreux réseaux hydrauliques en installant des pompes en parallèle et en combinant des variateurs de fréquence et des démarrateurs progressifs → 17.