

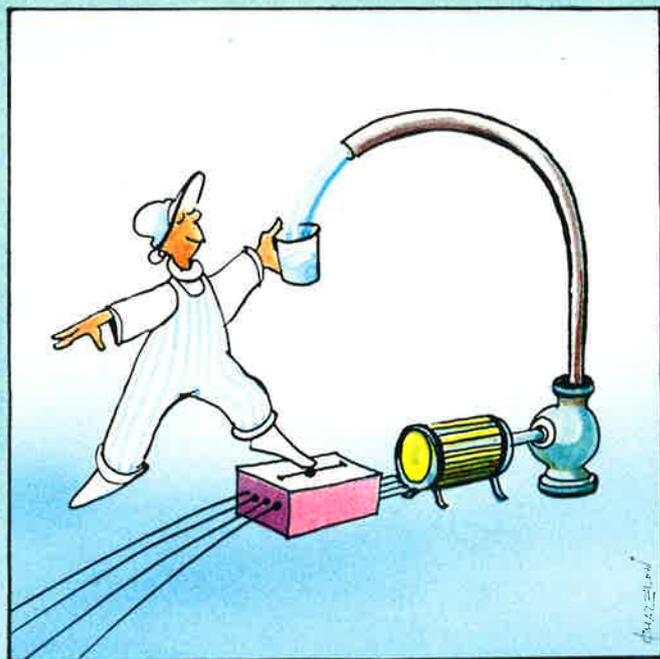
OFFICE INTERNATIONAL DE L'EAU
BIBLIOTHÈQUE DE LA DOCUMENTATION
ET DES SCIENCES
RUE Émile Chamberland
93000 NOGENT-SUR-MOISE CEDEX
Tél. 55 11 47 80
Telex 830 337 FONDEAU F

15.

LES
CAHIERS
TECHNIQUES



OFFICE
INTERNATIONAL
DE L'EAU



LES POMPES :
DEMARRAGE
ARRET
VARIATION
DE VITESSE

Ce cahier technique a été réalisé
avec le concours de la Société



Telemecanique

GROUPE SCHNEIDER

Achévé d'imprimer le 15 mai 1992
Imprimerie Centre Impression, Limoges
Dépôt légal : 2^e trimestre 1992

© OFFICE INTERNATIONAL DE L'EAU 1992
Droits de reproduction et de traduction réservés pour tous pays.

Prix : **75 FF/TTC**
Franco de port France métropolitaine

PREFACE

Dès lors que l'on désire véhiculer un fluide, la pompe est la machine tournante incontournable. Dans nos métiers de l'adduction d'eau et de l'assainissement, elle est souvent le **centre** du dispositif, ou sinon un maillon **essentiel** du process. **Pompes** centrifuges, **pompes hélices**, pompes doseuses, l'éventail **des matériels** est **large**, et permet de s'adapter à la demande de l'utilisateur.

Pour mettre en route et entraîner ces machines, le moteur électrique est devenu indispensable; l'ensemble électro-pompe est donc un élément familier des techniciens d'exploitation et de maintenance. Or, si le fonctionnement en régime permanent ne pose pas trop de problèmes, des aléas techniques surviennent lors des démarrages, arrêts, variations de débit - coups de bélier, disjonctions, surintensités,...

Hydrauliciens et électriciens cherchent alors des solutions, sans forcément bien se comprendre; pourtant, réseau, système de pompage et dispositif d'entraînement forment un ensemble indissociable. Il convient donc que les hydrauliciens connaissent bien les contraintes - couple, intensité - des électriciens et qu'en contre-partie ces derniers appréhendent celles de leurs confrères - point de fonctionnement, puissance absorbée.

Ce cahier technique a pour double ambition d'harmoniser le langage des opérateurs chargés de l'exploitation et de la maintenance des groupes de pompage et de démystifier certaines notions liées à l'hydraulique de transfert.

Alors le dialogue devient possible et la résolution du problème rapide.

On ne peut donc que se féliciter de la réalisation de ce guide, qui contribuera à améliorer la fiabilité de nos systèmes d'adduction d'eau et d'assainissement.

P. SCHULHOF
Président de la Commission
Distribution de l'Eau
de l'AGHTM



Sommaire

Des pages jaunes pour mieux utiliser ce guide

Des pages roses pour tester vos connaissances

Des pages bleues pour les informations théoriques

Des pages vertes pour vous aider à résoudre des problèmes concrets et quotidiens

1 POUR QUI, POUR QUOI ?	Page 3
A qui et à quoi peut servir ce guide et la façon de l'utiliser efficacement	
2 JEU-TEST	4
Pour sonder vos connaissances sur les pompes, leur démarrage, leur arrêt, et la vitesse variable. A faire avant et/ou après lecture de ce guide.	
3 LE SAVEZ-VOUS ?	6
Avez-vous une idée de l'importance des pompes et des composants électromécaniques qui leur sont associés dans le traitement de l'eau ? Connaissez-vous les conséquences d'un arrêt brutal des pompes ?	
4 DEMARRAGE ET ARRÊT DES POMPES	16
4-1- les pompes centrifuges	16
4-2- le démarrage des pompes	18
4-3- l'arrêt des pompes	22
5 VITESSE VARIABLE APPLIQUÉE AU POMPAGE	24
5-1- objectifs	24
5-2- moyens utilisables	26
6 DEMARRAGE ET PROTECTION DES MOTEURS	27
6-1- les moteurs	27
6-2- modes de démarrage	30
6-3- protections des moteurs	35
7 DEMARREUR RALENTISSEUR ELECTRONIQUE	37
8 VARIATEUR DE VITESSE PAR MODULATION DE FREQUENCE	38
9 LEXIQUE	39
10 INDEX	39
Pour mieux vous y retrouver dans l'ouvrage.	

1



POUR QUI POUR QUOI ?

POUR QUI ?

Ce cahier technique s'adresse aux exploitants et gestionnaires d'un service de distribution d'eau, aux responsables de la maintenance intervenant dans le domaine des eaux et de l'assainissement, ainsi que dans l'industrie, aux concepteurs d'armoires de commande de pompes, et à tous ceux qui souhaitent mieux connaître les problèmes liés à leur démarrage, leur arrêt, et leur variation de vitesse.

POUR QUOI ?

Le bon fonctionnement des pompes est une nécessité fondamentale pour assurer la permanence de la distribution de l'eau. Il est assuré sous deux conditions primordiales :

- une conception rigoureuse de l'installation dont le dimensionnement de la pompe et des conduites doit être réalisé conformément aux règles de l'art, aux normes et aux lois de l'hydraulique;
- la mise en place et le réglage minutieux de ce que l'on appelle habituellement "les protections".

Le moteur électrique est l'organe d'entraînement des pompes,

Suivant le processus, la commande de ce moteur sera plus ou moins sophistiquée; or le démarrage de celui-ci est souvent mal maîtrisé. Il peut s'ensuivre des perturbations au niveau du process, et des problèmes de vieillissement prématuré des installations.

Il est nécessaire que le mode de démarrage - et arrêt - des différentes machines tournantes (pompes, ventilateurs, compresseurs...) soit choisi avec circonspection, afin de ne pas nuire à l'ensemble de l'installation, et d'offrir un service sans faille.

Il importe alors que les concepteurs et exploitants connaissent les avantages, contraintes et potentialités des démarreurs.

COMMENT ?

Ce cahier technique peut s'utiliser de plusieurs façons : pour une première lecture, nous vous conseillons de feuilletter l'ensemble afin de bien comprendre la structure, la couleur des pages (voir sommaire) vous indiquant le type d'informations fournies, puis de reprendre au début.

Le jeu-test peut vous renseigner sur votre niveau de connaissances. Il pourra, par la suite, témoigner de vos acquisitions.

En suivant l'ordre proposé, vous aurez ainsi une bonne compréhension :

- de l'intérêt du démarrage et de l'arrêt progressif des pompes,
- des protections nécessaires au bon fonctionnement du moteur électrique,
- des potentialités des démarreurs électroniques.

Si vous cherchez une information précise, le lexique et/ou l'index peuvent vous permettre de la trouver rapidement.

Avec tous nos encouragements,

BON TRAVAIL.

2



JEU TEST

CACHER LA PARTIE "REPONSES AU TEST"

PRENDRE UN CRAYON A PAPIER.
LIRE ATTENTIVEMENT LES QUESTIONS.

COCHER LA OU LES CASES DES REPONSES PROPOSEES
QUI VOUS SEMBLER JUSTES

(pour une même question, une ou plusieurs réponses sont
possibles).

CONSULTER LES REPONSES.

1

Le phénomène du coup du bélier est lié :

- a - Au démarrage brutal des pompes
- b - A l'arrêt brutal des pompes
- c - A l'arrêt ou à l'ouverture rapide des vannes
- d - A des variations du débit sur le réseau
- e - A une forte pression de service sur le réseau

2

Le démarrage direct du moteur électrique est limité du point de vue énergétique :

- a - A des puissances inférieures à 50 kW
- b - A des puissances inférieures à 250 kW
- c - Ne l'est pas si on a assez de puissance sur la ligne d'alimentation

3

Un démarrage et un arrêt progressif des pompes pourraient-ils protéger complètement l'installation contre les coups de bélier ?

- a - Oui
- b - Non

4

Dans quel cas le démarrage des moteurs sera-t-il généralement plus aisé ?

- a - Dans le cas d'une pompe à piston
- b - Dans le cas d'une pompe à hélice
- c - Dans le cas d'une pompe centrifuge
- d - Cela sera identique dans tous les cas

5

Pour obtenir la variation de vitesse d'un moteur asynchrone, on peut :

- a - Faire varier la fréquence du courant d'alimentation
- b - Faire varier la tension d'alimentation
- c - Faire varier le nombre de paires de pôles

6

Lorsque la vitesse de rotation d'une pompe diminue

- a - Le débit diminue
- b - La pression diminue
- c - La puissance absorbée diminue

7

Lorsque l'on ferme la vanne au refoulement d'une pompe centrifuge

- a - La puissance absorbée augmente
- b - La puissance absorbée diminue
- c - La puissance absorbée ne change pas

8

L'appel de courant (I_d) au démarrage d'un moteur en direct est :

- a - De l'ordre de 2 à 3 In
- b - De l'ordre de 6 à 8 In
- c - De l'ordre de 10 à 15 In
- d - Dépend du type de moteur et de sa vitesse de rotation

9

Par rapport au démarrage à vide, le courant de démarrage I_d en charge est-il ?

- a - Supérieur
- b - Inférieur
- c - Identique

10

Suite à une chute de tension d'alimentation, le couple de démarrage

- a - Diminue
- b - Est constant
- c - Augmente

11

Suite à une chute de tension d'alimentation, le courant en charge

- a - Augmente
- b - Est constant
- c - Diminue

12

Suite à une chute de tension d'alimentation, le courant de démarrage

- a - Diminue
- b - Augmente
- c - Ne varie pas

Suite à une chute de tension d'alimentation, les pertes Fer

- a - Diminuent
 b - Augmentent
 c - Restent constantes

14

Suite à une chute de tension d'alimentation, le facteur de puissance

- a - Augmente
 b - Diminue
 c - Restent constant

15

Suite à une chute de tension d'alimentation, les pertes Joules

- a - Diminuent
 b - Augmentent
 c - Restent constants

16

Suite à une chute de tension d'alimentation, le rendement

- a - Augmente
 b - Diminue
 c - Reste constant

17

Un démarrage à vanne fermée au refoulement

- a - Facilite le démarrage des pompes
 b - Rend plus difficile le démarrage des pompes
 c - N'a pas d'incidence
 d - Est plus ou moins facile suivant le type de pompe

18

Un démarrage sur un réseau de refoulement vide

- a - Est plus facile
 b - Est plus difficile
 c - Est plus ou moins facile suivant le type de pompe

19

Dans la pratique, la variation de vitesse maximale admissible sur une installation de pompage à vitesse variable est de l'ordre de :

- a - $\pm 5\%$
 b - $\pm 10\%$
 c - $\pm 20\%$
 d - $\pm 30\%$
 e - $\pm 50\%$

20

Pour limiter le coup de clapet, on peut :

- a - Installer des clapets à forte inertie
 b - Installer des clapets à faible inertie
 c - Installer un ballon anti-bélier
 d - Installer un système d'arrêt progressif de la pompe

Réponses au test

23	b (clapet rapide et silencieux) et d	20
25	c	19
21	C (facile pour pompe à hélice, difficile pour pompe centrifuge)	18
19	d	17
36	b	16
36	b	15
36	a	14
36	a	13
31	a	12
36	a	11
29-31	a	10
39	c	9
30-31	b d	8
17	b	7
24	a b c	6
29	a c	5
18 à 21	c	4
23	b (ex. : en cas de disjonction ou variation du débit sur le réseau)	3
31	a c	2
22-23	a b c d	1
VOIR PAGE	REPONSE	

3

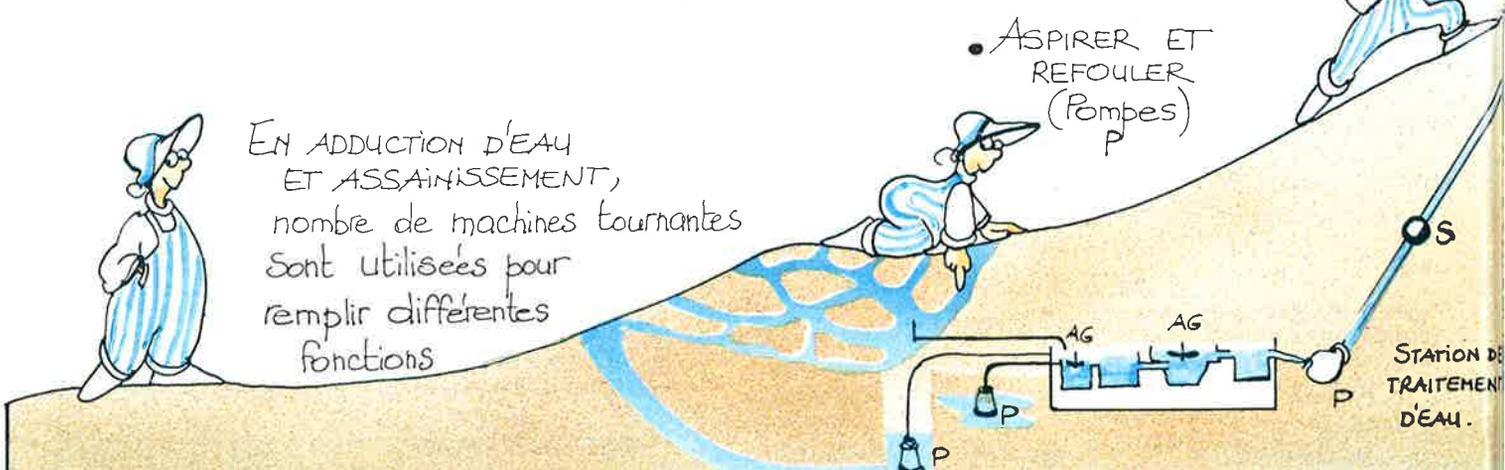
LE SAVEZ-VOUS?



• BRASSER
(Agitateurs)
AG

• ASPIRER ET
REFOULER
(Pompes)
P

EN ADDUCTION D'EAU
ET ASSAINISSEMENT,
nombre de machines tournantes
sont utilisées pour
remplir différentes
fonctions



STATION DE
TRAITEMENT
D'EAU.

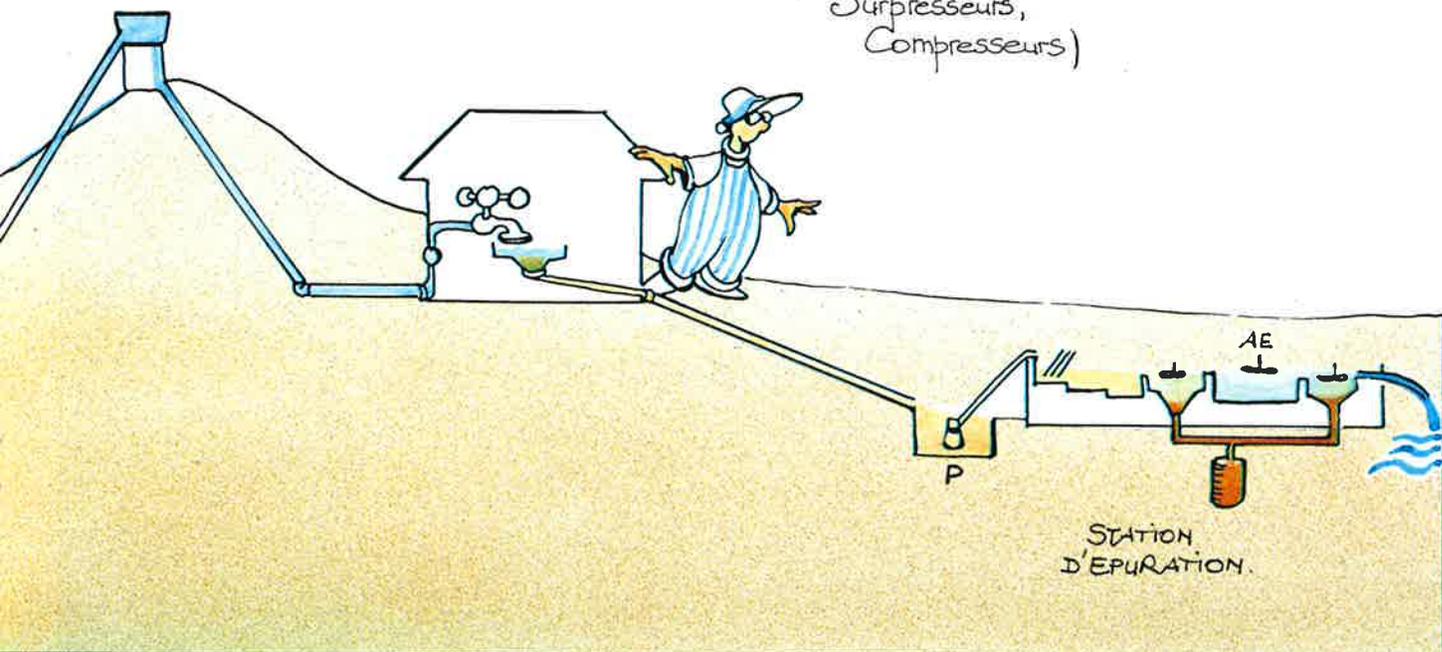
POUR ENTRAINER
ces machines tournantes,
on peut utiliser
différentes
énergies
motrices...

... le bras d'un
utilisateur...

... Un animal...



- AERER
(Aérateurs AE,
Surpresseurs,
Compresseurs)



... Un MOTEUR

- thermique
- à explosion

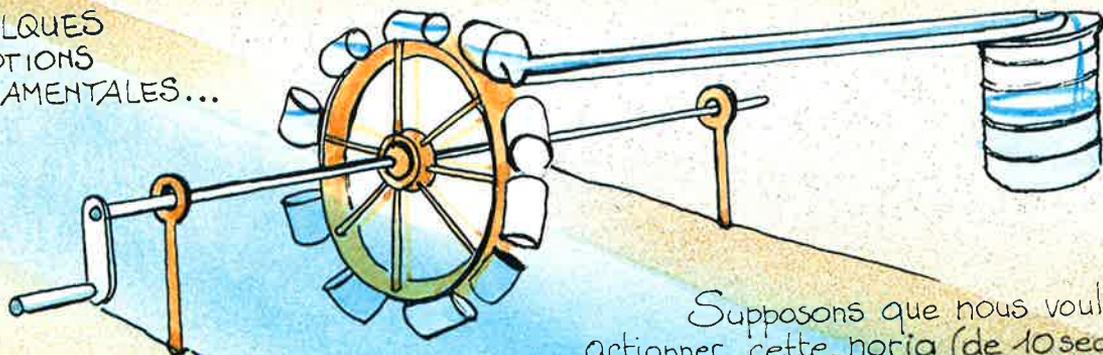
... OU UN MOTEUR ELECTRIQUE.



De par son côté pratique (compact, robuste, fiable, facile d'entretien, souple et facile d'alimentation en énergie (réseau électrique disponible) c'est le moteur ELECTRIQUE qui est le plus utilisé.



QUELQUES
NOTIONS
FONDAMENTALES...

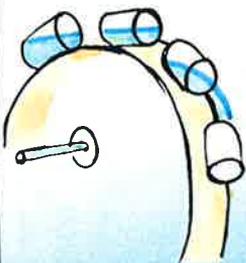


Supposons que nous voulions
actionner cette noria (de 10 seaux)
pour relever 20 seaux d'eau par minute

A. Il faudra d'abord
une **FORCE**
suffisante...



... pour mettre
la noria en mouvement... →



... c'est à dire
vaincre la
RÉSISTANCE
de la
noria et
de l'eau...



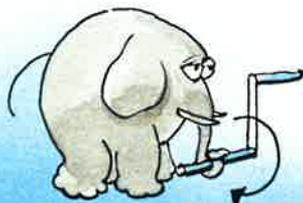
4
CANDIDATS

1. Mon petit frère



PAS ASSEZ FORT
Éliminé

2. Son petit éléphant



OK
Qualifié

3. Le père du
petit
éléphant...



TROP BRUTAL (a tout cassé)
Éliminé

4. Et moi-même...



OK
Qualifié

B. Ensuite, assurer une **VITESSE** Suffisante pour atteindre le débit désiré...



...à savoir 20 seaux par minute...



...Soit 2 tours de 10 seaux par minute



Le petit éléphant est très fort, mais aussi très lent.



Trop lent: 1,7 tour par minute:

— Eliminé! —

Alors que moi-même, pourtant non favori, mais surmotivé par le challenge...



... je réalise 2,1 tour par minute...

C'est donc MOI-M'AI ME qui avait la **PUISSANCE** la mieux adaptée à ce problème.



LA **PUISSANCE**...

c'est donc:

la **FORCE** x la **VITESSE**



Un peu de
VOCABULAIRE

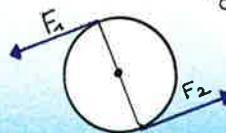


On appelle
la "FORCE"
du moteur ...



... le COUPLE MOTEUR

(parce qu'il s'agit
en fait
d'un couple
de forces
parallèles et
opposées qui
créent la "torsion")



On appelle la
RESISTANCE
de la noria...



... ou d'une autre
machine tournante...



... le
COUPLE RÉSISTANT



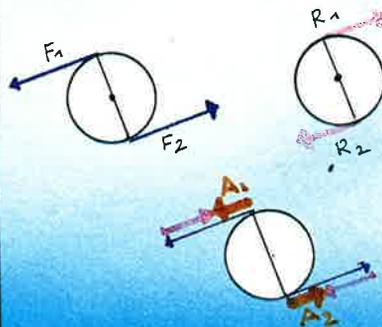
La différence entre
les 2 couples, ...



... qui permet d'augmenter
progressivement
la vitesse de rotation
jusqu'à l'obtention
de la vitesse désirée

...

... c'est le
COUPLE D'ACCELERATION.



ATTENTION

Si le couple d'accélération est trop grand...



... c'est à dire si la mise en vitesse est...

trop rapide et mal adaptée à la machine à entraîner...



(N'est-ce pas Monsieur l'éléphant?)

Mais si le couple d'accélération est trop faible...



... et la mise en vitesse trop lente, le moteur doit supporter très longtemps une forte intensité: il se

produit un surchauffement qui est toujours à l'origine d'importantes avaries, surtout pour ... le moteur.



C'est surtout lors du démarrage et lors de l'arrêt* que le couple d'accélération varie le plus fortement ...

... Il peut s'ensuivre des CONSÉQUENCES très fâcheuses en particulier

pour UN DÉMARRAGE et un ARRÊT NON MOINS BRUTAL DU MOTEUR



* Pour l'arrêt, l'accélération est négative: c'est la décélération.

CONSEQUENCES FACHEUSES POUR LE MOTEUR ET LA MACHINE TOURNANTE



• SURÉCHAUFFEMENT

Endommagement de pièces non adaptées à une augmentation de température (comme par exemple les isolants diélectriques)

• A-COUPS MECANQUES

Endommagement des pièces en mouvement : rotor*, roulements, transmissions



* rotor: voir page 13

CONSEQUENCES TRÈS FACHEUSES POUR LE RÉSEAU. par exemple :



Le démarrage ou l'arrêt direct d'une pompe...

... provoquent des variations de débit très importantes...



... et des variations de pression considérables dans le réseau.

RÉSULTAT:



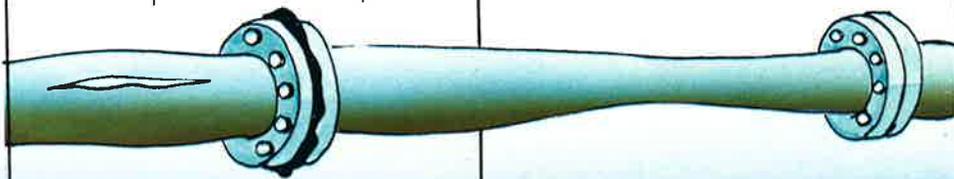
Coups de Bélier classiques avec leur cortège d'incidents :

SURPRESSION

- Rupture des tuyaux

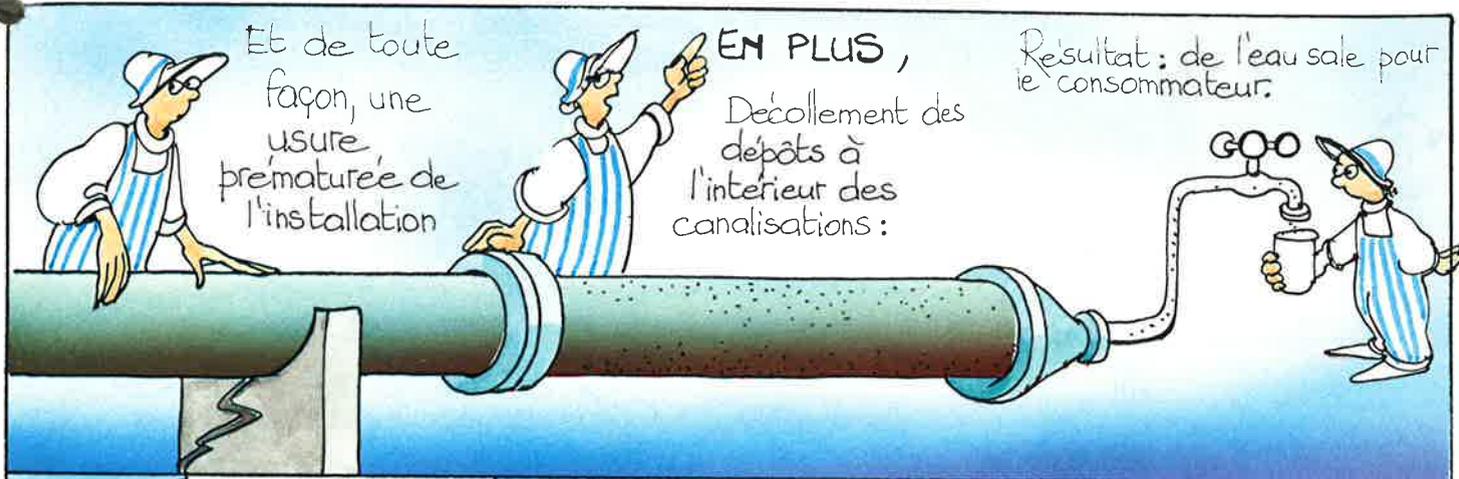
PRESSION NÉGATIVE

- Implosion de la conduite



- Déboîtements des tuyaux

- Aspiration des joints



Et de toute façon, une usure prématurée de l'installation

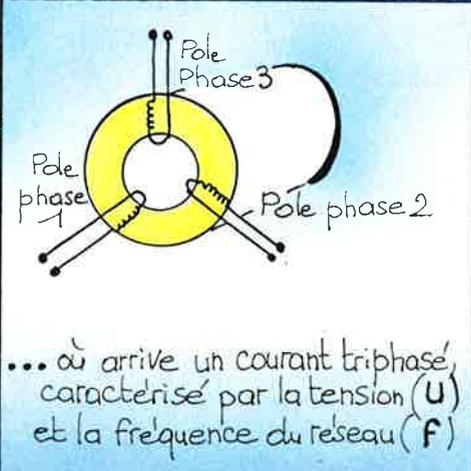
EN PLUS,
Décollement des dépôts à l'intérieur des canalisations:

Résultat: de l'eau sale pour le consommateur.



ALORS, que faire ?
DÉMARRER ET ARRÊTER correctement le moteur.

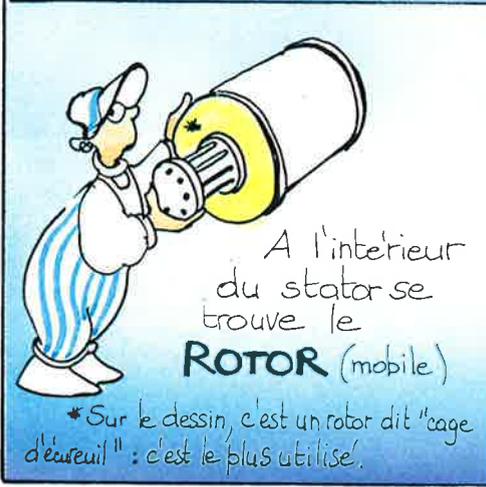
Un moteur électrique, c'est un **STATOR** ...
(pièce fixe)



... où arrive un courant triphasé, caractérisé par la tension (U) et la fréquence du réseau (f)

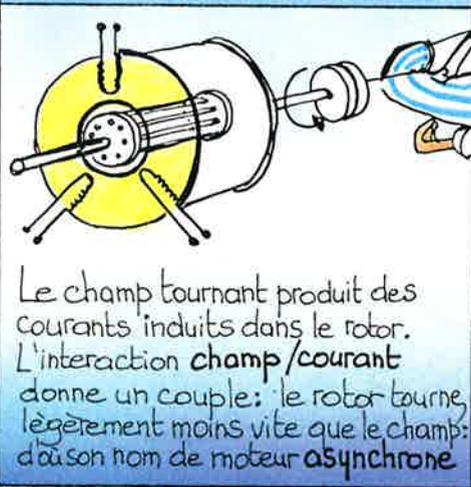


Les 3 phases alimentent 3 bobines de façon décalée: cela crée un champ magnétique tournant (↻)



A l'intérieur du stator se trouve le **ROTOR** (mobile)

* Sur le dessin, c'est un rotor dit "cage d'écuriel": c'est le plus utilisé.

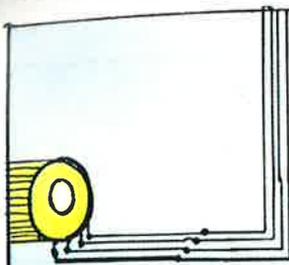


Le champ tournant produit des courants induits dans le rotor. L'interaction champ/courant donne un couple: le rotor tourne légèrement moins vite que le champ: d'où son nom de moteur **asynchrone**

Le rotor peut alors entraîner une machine tournante.

NB

- La vitesse du rotor dépend de la vitesse du champ tournant qui ne dépend que de la fréquence du réseau (f) et du nombre de pôles: la vitesse est indépendante de la tension
- Par contre: Le couple moteur est proportionnel au CARRÉ DE LA TENSION: ($C = k U^2$)



On peut démarrer le moteur en le branchant **DIRECTEMENT** sur le réseau

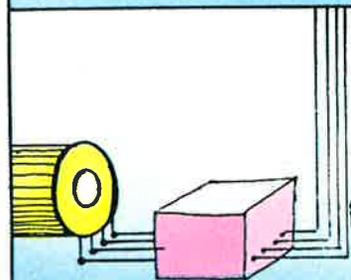
→ Cela crée un appel de courant important (5 à 8 fois le courant nominal)

→ Le couple est environ 1,5 fois le couple nominal.

→ A-coup mécanique.

→ C'est parfois incompatible avec la machine tournante.

→ Risque d'échauffement



On peut utiliser un **SYSTÈME DE DEMARRAGE**



Son rôle va être de modifier **PROVISOIREMENT** les caractéristiques du moteur, en particulier pour :

→ diminuer l'**INTENSITÉ** du courant au démarrage

→ réduire le **COUPLE** de démarrage.



Il peut le faire en diminuant provisoirement la **TENSION** (la fréquence restant constante)



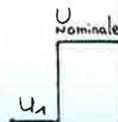
Comment réduire la tension ?

Plusieurs Solutions :

- ① ② ③ ④



① EN ALIMENTANT LES BOBINES DU STATOR :
D'ABORD : EN ÉTOILE



La tension est divisée par $\sqrt{3}$
L'intensité est divisée par 3
Le couple est divisé par 3

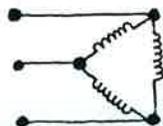
Il faut choisir le bon moment, mais le passage étoile/triangle est toujours délicat.

② On peut insérer des **RESISTANCES** entre le réseau et le stator...



L'intensité et le couple diminuent

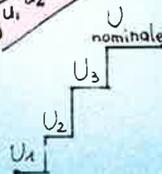
... puis les supprimer



Le couple peut alors augmenter pour atteindre sa valeur nominale.



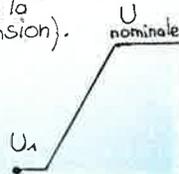
③ On peut insérer un **AUTO-TRANSFORMATEUR**



④ On peut utiliser un **GRADATEUR DE TENSION électronique**



(Pas d'a-coup dans la variation de la tension).





On peut aussi faire varier la tension et la fréquence aux bornes du moteur...



... grâce à un variateur électronique qui modifie simultanément la tension et la fréquence (dans un rapport prédéterminé $K = \frac{U}{f}$)



... et permet d'agir directement sur la VITESSE du rotor...



... aussi bien au DEMARRAGE... que pendant...



... le fonctionnement, ce qui permet par exemple, dans le cas d'une pompe, de s'adapter au débit désiré, sans perte de rendement.



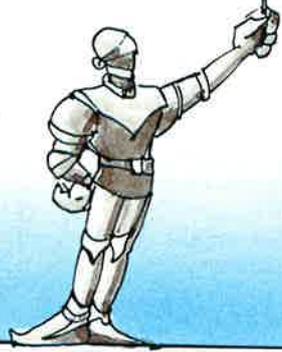
Un tel variateur est capable également de:

RECEVOIR DES INFORMATIONS



LES TRAITER...

ET AGIR en conséquence.



Il peut ainsi assurer une protection efficace du moteur, et donc du réseau.

Et en plus...



il permet

un

arrêt

en douceur:

Non A L'ARRÊT-NET,
VIVE L'ARRÊT-GLISSE ...





4

DEMARRAGE ET ARRET DES POMPES

1. LES POMPES CENTRIFUGES

Les pompes centrifuges sont dites "rotodynamiques". C'est-à-dire qu'elles fournissent au liquide une énergie cinétique (mouvement de rotation, vitesse élevée) qui sera ensuite convertie en pression. Leurs performances (hauteur, débit, rendement, puissance) sont données par des courbes établis au cours d'essais sur banc. La forme de ces courbes varie légèrement selon le type de roue équipant la pompe :

- roue radiale ou centrifuge fournissant une hauteur élevée et un débit faible,
- roue semi-axiale ou hélicocentrifuge fournissant un compromis entre hauteur et débit,
- roue axiale ou hélice fournissant un débit élevé sous une faible hauteur.

Ces roues sont caractérisées par un coefficient appelé vitesse spécifique (N_s) représentatif du rapport débit-pression de chaque zone :

$$N_s = \frac{N\sqrt{Q}}{H^{3/4}}$$

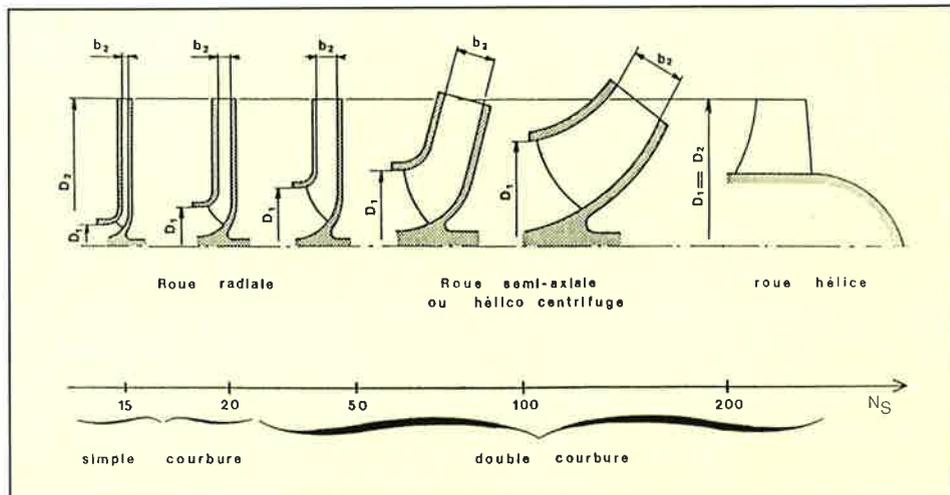
avec :

H = hauteur en m par roue au point nominal

Q = débit nominal en m³/s

N = vitesse de rotation en tours/mn

On voit que plus une roue fournit un débit important par rapport à sa hauteur et plus sa vitesse spécifique est élevée (et inversement).



Géométrie des roues en fonction de la vitesse spécifique (D'après Jeumont Schneider).

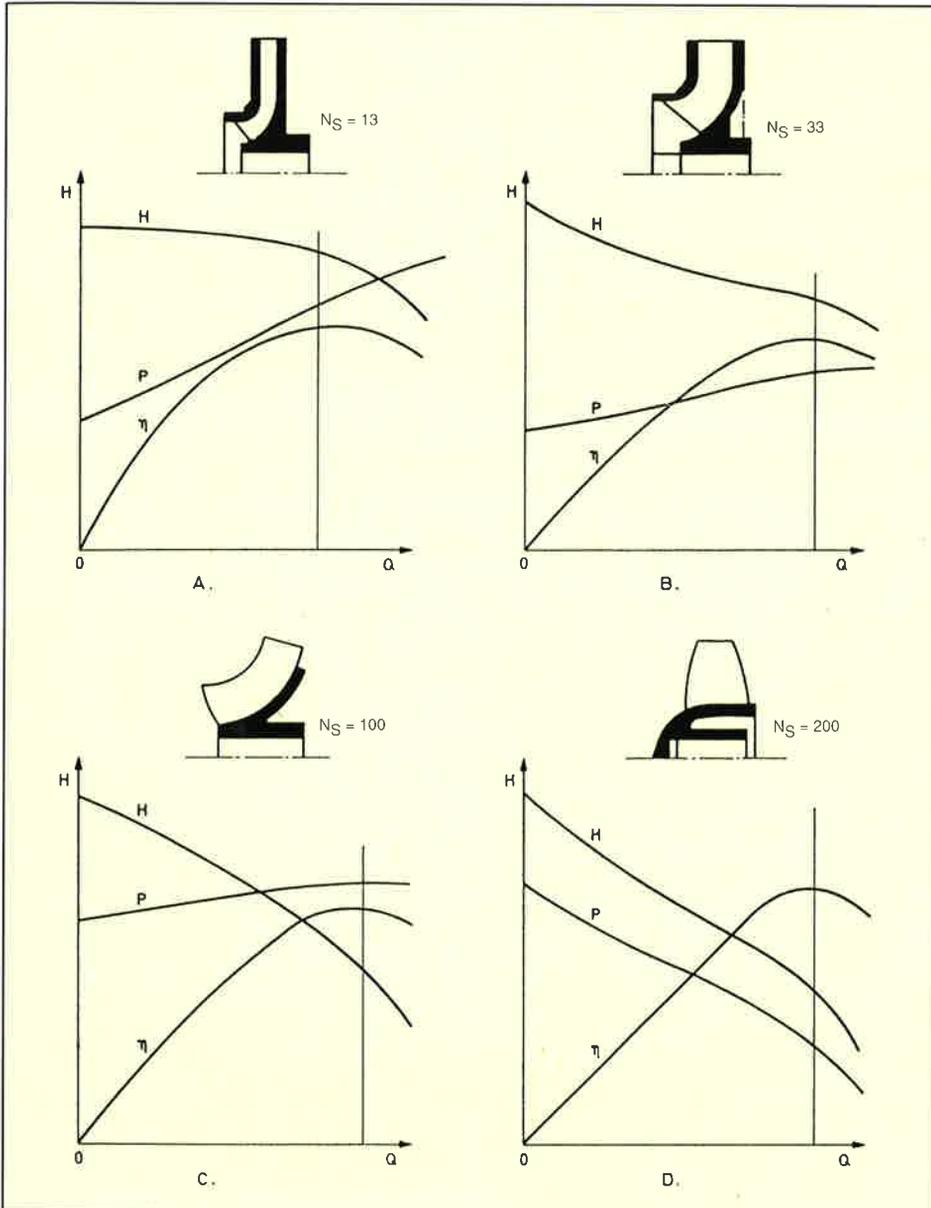
Roues radiales : $N_s \rightarrow 10 \text{ à } 40$
 Roues semi-axiales : $N_s \rightarrow 60 \text{ à } 150$
 Roues axiales : $N_s \rightarrow \text{plus de } 200$



La principale différence dans le comportement de ces différentes roues porte sur la puissance. La courbe de puissance, fortement croissante pour une roue radiale, tend à s'aplatir et à s'inverser pour des roues à N_S élevé. Ainsi, la puissance sur arbre d'une pompe hélice diminuera avec l'augmentation du débit.

A vitesse constante, on pourra conclure :

- roue radiale (N_S faible) = couple augmentant avec l'accroissement du débit,
- roue axiale (N_S élevé) = couple diminuant avec l'accroissement du débit.



2. LE DEMARRAGE DES POMPES

Les machines rotodynamiques ont un couple résistant qui augmente avec la vitesse de rotation.

L'inertie d'une pompe centrifuge est généralement faible par rapport au couple moteur, ce qui permet, au démarrage, d'atteindre très rapidement la vitesse nominale.

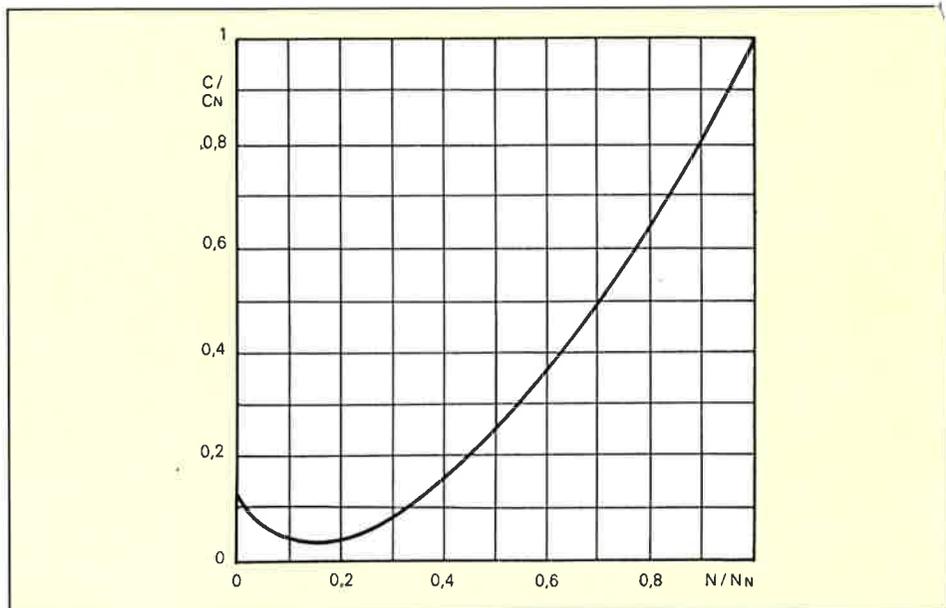
L'évolution du couple est parabolique.

$$C_2 = C_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2$$

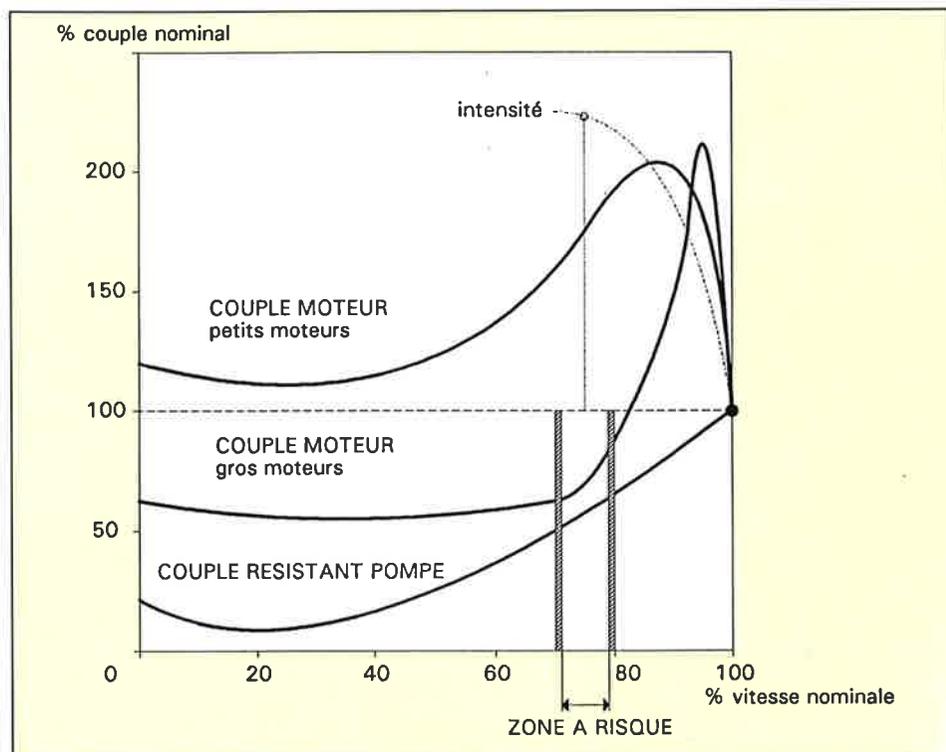
Le couple initial à $N = 0$ est dû au frottement des pièces mécaniques. Il peut représenter, selon le type de pompe, 10 à 25% du couple nominal.

Cependant, suivant leur puissance, les moteurs électriques ont des courbes de couple au démarrage assez variables.

Pour les gros moteurs, la valeur du couple peut plafonner assez bas jusqu'à une vitesse égale à 80% de la vitesse nominale. Sur cette zone, le couple résistant de la pompe peut approcher dangereusement la valeur du couple disponible et ainsi engendrer un arrêt de l'accélération. La vitesse se maintient alors au-dessous de la vitesse nominale avec un risque important de destruction des bobinages par surintensité.



Couple résistant au démarrage vanne ouverte (D'après Guinard).



Couple des moteurs électriques au démarrage (D'après Sulzer).

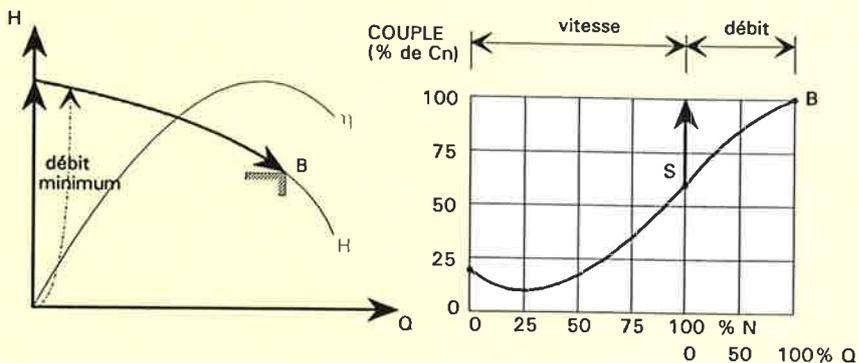
Les pompes centrifuges peuvent être démarrées suivant différents modes :

a) Démarrage vanne fermée :

Pour les pompes à faible vitesse spécifique, c'est un mode de démarrage fréquent, car il permet d'en limiter la durée et le couple.

Le démarrage est réalisé en deux temps :

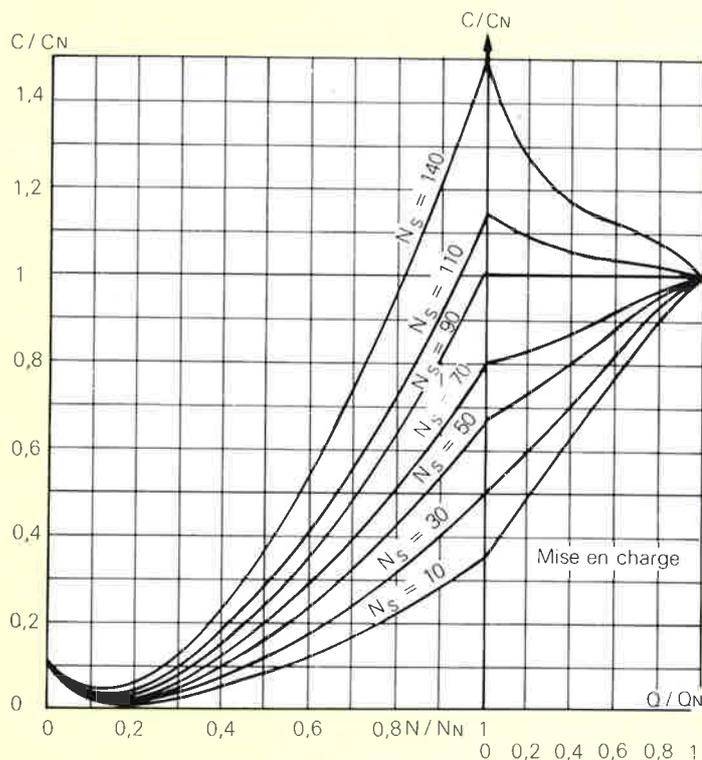
- d'abord, vanne fermée, en faisant varier la vitesse de 0 à N_1 ,
- ensuite, à vitesse constante, en ouvrant la vanne et en faisant varier le débit de 0 à Q_N .



Démarrage sur vanne fermée (D'après Sulzer).

Les courbes suivantes représentent l'évolution du couple au cours du démarrage pour différentes vitesses spécifiques

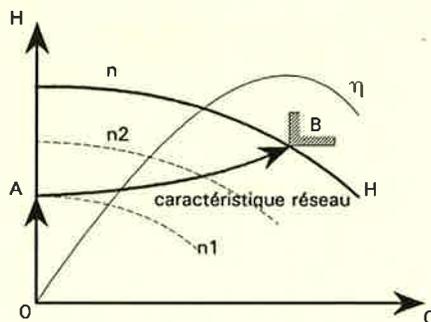
On constate que, lorsque la vitesse spécifique devient supérieure à 90 (domaine de l'hélicentrifuge et de l'hélice), le démarrage à vanne fermée n'offre plus d'intérêt du point de vue électrique. Lorsque la vitesse spécifique est supérieure à 110, un démarrage à vanne fermée conduirait à surdimensionner le moteur.



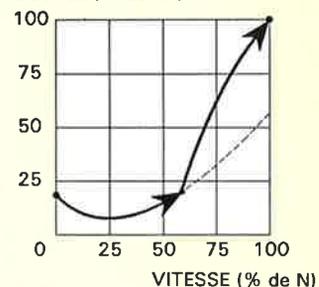
Evolution du couple au cours du démarrage pour différentes vitesses spécifiques (D'après Guinard).

b) Démarrage vanne ouverte avec hauteur géométrique (clapet anti-retour fermé)

Le système se comporte comme dans le cas précédent jusqu'à ce que la pression dépasse la hauteur géométrique. A ce moment là, le clapet s'ouvre et le point de fonctionnement se déplace le long de la courbe réseau jusqu'en B.



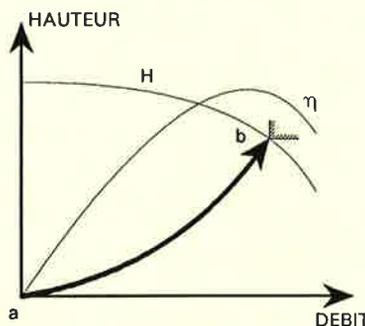
COUPLE (% de C_n)



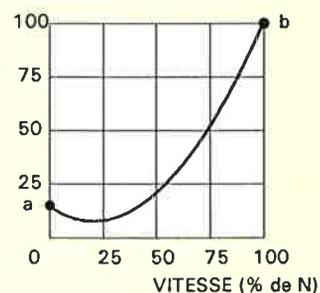
(D'après Sulzer)

c) Démarrage vanne ouverte sans hauteur géométrique

La courbe de couple, nous l'avons vu, est parabolique. Le point de fonctionnement, durant l'accélération, va suivre la courbe réseau jusqu'en B. La pompe débite dès le début du démarrage.



COUPLE (% de C_n)

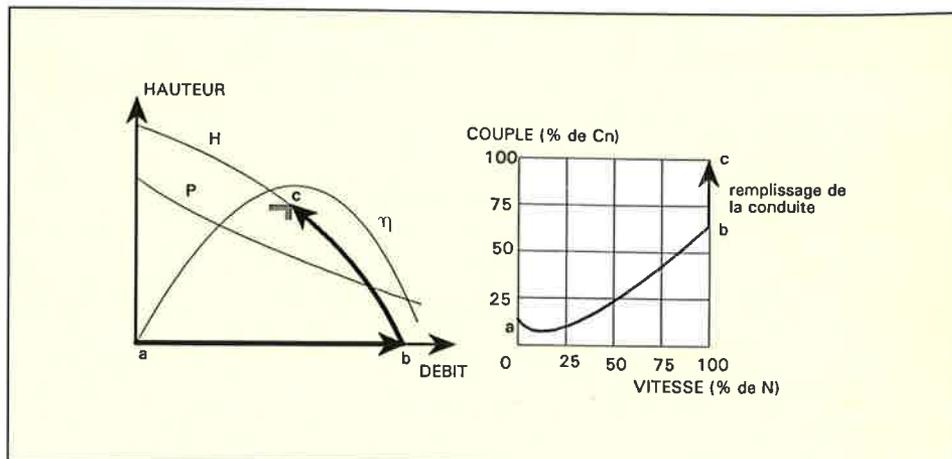


(D'après Sulzer)

b) Démarrage vanne ouverte avec conduite de refoulement vide

C'est un mode de démarrage fréquent pour les pompes à haute vitesse spécifique. Il est préférable de réaliser le remplissage de la conduite le plus rapidement possible, afin de générer une contre-pression qui évitera à la pompe de travailler trop longtemps dans les zones à risque de cavitation élevée.

L'augmentation du couple lors du remplissage du tuyau s'explique par la pente négative de la courbe puissance.



(D'après Sulzer)

CONCLUSION :

Le mode de démarrage des groupes de pompage dépendra donc étroitement du type de machine utilisée ainsi que des accessoires et de la caractéristique du réseau.

- Pompes à faible vitesse spécifique (pompe centrifuge) :

- démarrage vanne fermée,
- démarrage vanne ouverte sur clapet anti-retour avec contre-pression suffisante due à la hauteur géométrique.

- Pompes à vitesse spécifique élevée (pompe hélice) :

- démarrage sur réseau vide,
- démarrage vanne ouverte sur clapet anti-retour avec faible contre pression (le démarrage vanne fermée est exclu pour une pompe à N_S élevé et, bien souvent, la robinetterie est absente de l'installation).

Si l'on démarre en augmentant progressivement la vitesse de rotation (variation de vitesse), on retrouve les mêmes cas de figure, mais le point de fonctionnement se déplace alors beaucoup plus lentement le long des courbes pour atteindre le débit nominal.

3. L'ARRÊT DES POMPES

A l'arrêt des pompes est souvent associé un phénomène connu et redouté des exploitants, le coup de bélier. Ce coup de bélier n'est pas uniquement lié à l'arrêt des pompes; c'est une conséquence de ce que l'on appelle "transitoires hydrauliques" (il y a transitoire entre deux états permanents; par exemple, du débit nominal au débit nul, ou du débit nul au débit nominal).

Dans une station de pompage, les problèmes liés au coup de bélier surviennent donc :

- à l'arrêt ou au démarrage des pompes,
- à l'ouverture ou la fermeture des vannes et clapets,
- lors de modifications d'écoulement sur le réseau (ventousage, remplissage de conduite ...).

Détérioration de conduite liée à un coup de bélier (Doc. Sulzer).



Si le transitoire hydraulique est suffisamment doux, le coup de bélier peut être considérablement limité, voire même annulé. Pour ce faire, on pourra :

- jouer sur les temps d'ouverture et de fermeture des vannes au refoulement des pompes (établissement et annulation progressifs du débit),
- jouer sur la vitesse de rotation des pompes au démarrage et à l'arrêt (rampe d'accélération et de décélération, d'où encore établissement et annulation progressifs des débits).

Cependant, si ces dispositifs sont très intéressants car ils limitent les causes du coup de bélier, ils ne protègent pas de la disjonction. Lors d'une coupure de courant, les pompes s'arrêtent simultanément sans plus aucun contrôle préalable. On trouve là les conditions extrêmes de pression et de dépression, à partir desquelles seront dimensionnés les systèmes de protection anti-bélier.

On remarque, en effet, que le coup de bélier ne génère pas seulement une surpression, mais aussi une dépression.

Cette dépression peut être extrêmement dommageable si elle passe au-dessous de la tension de vapeur du liquide pompé : création de vide et de poche de cavitation, décrochement de la colonne liquide, aspiration des joints, risque d'écrasement de la canalisation ou d'explosion de celle-ci lorsqu'il y a résorption brusque des poches de cavitation.

Les valeurs de la dépression et de la surpression dues au coup de bélier s'estiment à partir de la formule

$$P_{cb} = \pm \frac{a \cdot v}{g}$$

P_{cb} = pression ou dépression due au coup de bélier, en mCE

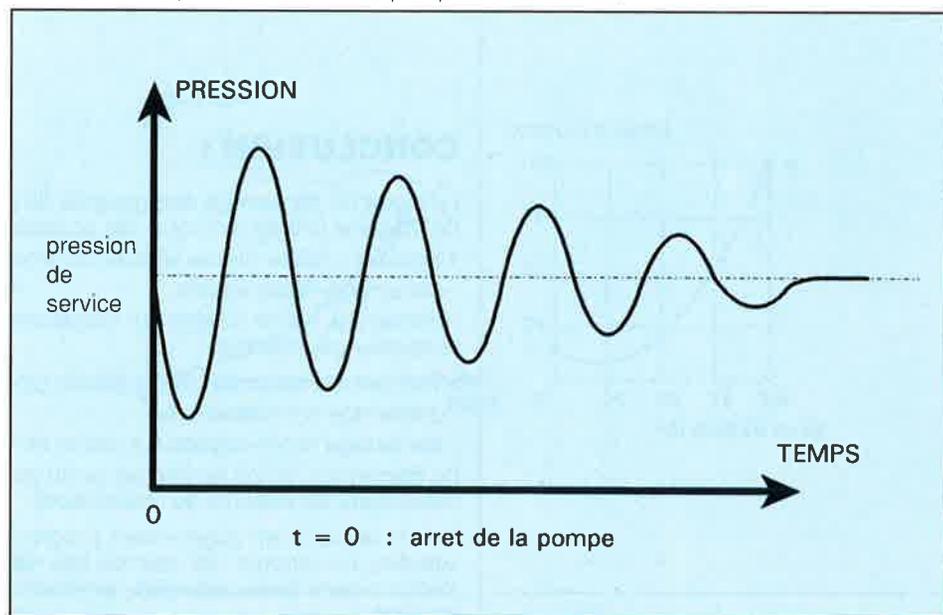
a = vitesse de propagation des ondes dans le matériau de la canalisation en m/s

v = vitesse de l'eau dans la canalisation en m/s

g = gravité : 9,81 m/s²

On s'aperçoit que les valeurs extrêmes de pression ne sont pas liées à la pression de service, mais plutôt au débit et à la rigidité du matériau.

Evolution de la pression derrière la pompe lors d'un arrêt.



Comparaison des dispositifs anti-bélier.

Dispositifs	Principe	Protection dépression	Protection surpression	Remarques	
Ballon	Capacitif	+++	+++	Plus courant	Dispositifs principaux
Cheminée	Capacitif	+++	+++	Protection points hauts	
Volant	Pompes débitent plus longtemps	++	++	Pour conduites < 500 m	
Soupape	Ecrêtage surpressions	0	+	Sécurité	Dispositifs secondaires
By-pass	Alimentation par aval lors dépression	+	0	Installation basse pression	
Ventouse	Limite dépression	+	0	Attention à l'air dans les conduites	
Réservoir	Alimentation conduite lors dépression	++	0	Protection points hauts	
Vanne motorisée	Transitoires doux	++	++	N'est pas valable pour toutes les pompes	Dispositifs annexes ne protégeant pas contre la disjonction
Démarrure-ralentisseur ou variateur de vitesse	Transitoires doux	+++	+++	Toutes installations (ne protège pas pour incidents sur réseau)	

(D'après Sulzer)

La définition d'un système anti-bélier consiste à :

- vérifier si le système a besoin d'une protection,
- choisir le type de protection,
- dimensionner le dispositif.

Un autre phénomène est associé à l'arrêt des pompes, et souvent confondu avec le **coup de bélier**. Il s'agit du **coup de clapet**. Le phénomène apparaît lors de l'arrêt d'une ou de plusieurs pompes (fonctionnement en parallèle). Il se traduit par un choc important du clapet sur son siège, générant bruit et vibrations dommageables pour le calage des tuyauteries.

Il est dû à une inversion du débit avant la fermeture du clapet. Paradoxalement, l'installation d'un ballon hydropneumatique, appareil très courant de protection, peut aggraver la situation dans la mesure où il génère une inversion de débit sur le tronçon ballon-clapet lors de l'arrêt des pompes. Pour lutter contre ce phénomène très gênant, on peut adapter le clapet (clapet



Ballons anti-bélier.

rapide et à peu d'inertie) ou obtenir un arrêt progressif des pompes. Le démarreur-ralentisseur, associé de toute façon à un ballon hydropneumatique, permettrait alors d'annuler pratiquement les coups de bélier au démarrage et à l'arrêt, ainsi que les coups de clapet. Le ballon anti-bélier n'est alors fonctionnel qu'en cas de "coup dur", disjonction d'une ou de plusieurs pompes.

Le fonctionnement du système est beaucoup plus souple, n'entraîne pas de nuisance (bruit, vibrations) et augmente la durée de vie du système complet : moindre fatigue des tuyaux (diminution du phénomène de la respiration de conduite, lié à l'alternance de pression-surpression), moindres à-coups méca-niques sur les moteurs, accouplements et pompes, ...

N.B. : une rampe d'accélération ou de décélération trop longue peut nuire à la fiabilité des systèmes de guidage équipés de paliers hydrodynamiques (butées de groupes immergés par exemple); il convient donc de vérifier que les temps de démarrage et d'arrêt soient compatibles avec la mécanique.



5

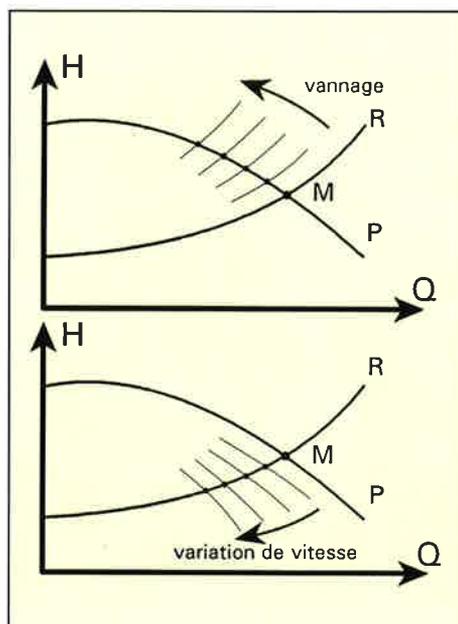
VITESSE VARIABLE APPLIQUEE AU POMPAGE

1. OBJECTIFS

Les courbes caractéristiques des pompes centrifuges sont tracées pour un fonctionnement à une vitesse constante généralement imposée par le mode d'entraînement le plus courant : les moteurs asynchrones.

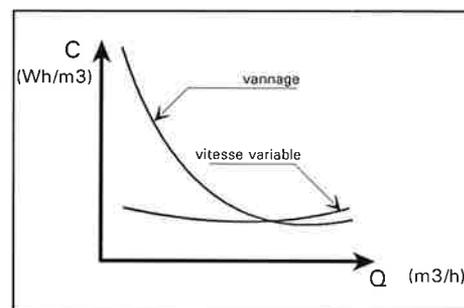
Il est possible de modifier la caractéristique d'une pompe en faisant varier sa vitesse de rotation en fonctionnement. On peut ainsi faire fluctuer débit et pression en fonction des besoins.

Le point de fonctionnement ne se déplace plus le long de la courbe pompe comme en vannage, mais le long de la courbe réseau.



Evolution du point de fonctionnement en vannage ou variation de vitesse.

Par rapport à du vannage, la réduction du débit n'engendre pas d'augmentation inutile de pression et on réalise une substantielle économie d'énergie.



Consommation spécifique.

est possible de monter en survitesse si un accroissement de débit s'avère nécessaire.

ATTENTION : Cette variation de vitesse ne peut s'opérer que dans une fourchette de $\pm 20\%$ de la vitesse nominale. Au-delà, les pertes hydrauliques deviennent importantes et les lois de similitudes ne peuvent plus s'appliquer.

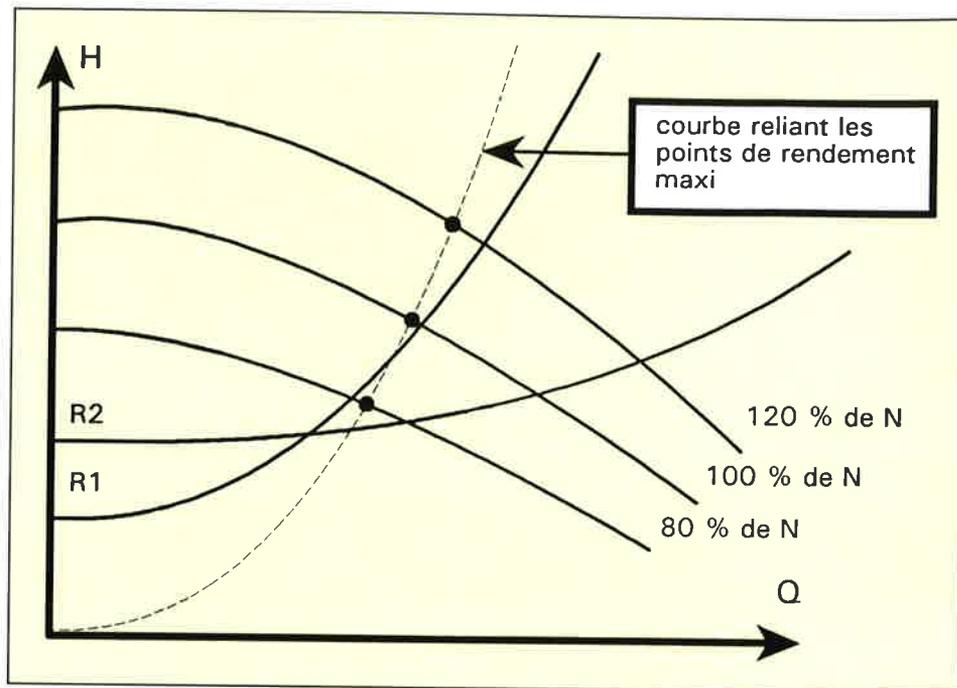
La courbe des points de meilleur rendement étant d'allure parabolique, la vitesse variable sera indiquée dans le cas de réseaux à fortes pertes de charge et faible hauteur géométrique. Le point de fonctionnement fluctuera alors dans des zones à excellent rendement (R1).

Au contraire, dans le cas d'un réseau à caractéristique "plate", on s'éloignera rapidement des zones de rendement élevé (R2). De plus, on risque de "décrocher" prématurément faute d'une pression suffisante dans les faibles débits.

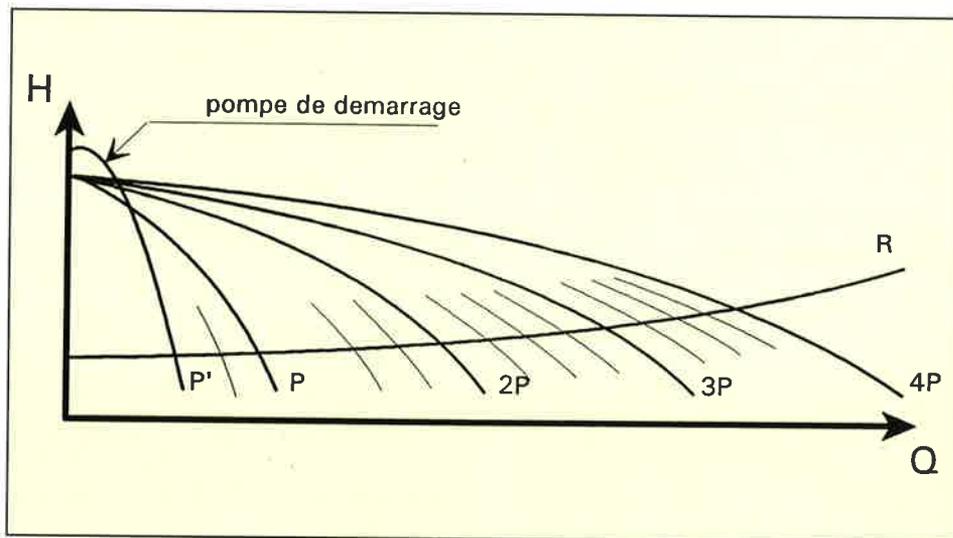
La forme de la courbe réseau et la plage de fonctionnement de la pompe sont des points essentiels à prendre en compte avant la mise en œuvre d'un dispositif de variation de vitesse.

ATTENTION : La puissance augmentant avec le cube du rapport des vitesses, on devra s'assurer que le moteur n'est pas en surcharge en cas de survitesse.

Dans une station de pompage équipée de pompes en cascade, une ou plusieurs de ces pompes peuvent être équipées d'un dispositif de variation de vitesse.



Intérêt de la vitesse variable suivant le type de réseau.



Pompe en cascade et vitesse variable.

Variateur de vitesse	Technique	Entraînement		Vitesse		Éléments de comparaison						Caractère spécifique
		Direct	Indirect	Infér.	Supér.	Rendern.	Investiss.	Encomb.	Fiabilité	Mainten.	Environn.	
MECANIQUE												
A courroie	Poulies variables		•	•	•	0	+	0	+	0	0	Variation de vitesse limitée
A friction	Galets/Disques		•	•	•	0	0	-	+	0	+	Vitesse et puissance limitées
THERMIQUE												
Turbine à gaz	Combustion interne	•		•	•	-	-	0	+	+	-	Grande vitesse de rotation
Turbine à vapeur	Combustion externe	•		•	•	+	-	0	+	+	+	Grande vitesse de rotation
Moteur thermique	Combustion interne	•		•	•	-	0	0	-	-	-	Utilisation en secours
HYDRAULIQUE												
Coupleur	Turbine à écope		•	•		0	-	-	+	+	+	Rendement faible
ELECTRIQUE												
Coupleur	Electromagnétique		•	•		-	0	-	+	+	-	Rendement faible
Moteur CC	Tension variable	•		•	•	+	0	+	+	0	-	Survitesse importante
Moteur CA à bague	Rhéostat de glissement	•		•		-	+	+	+	0	-	Limité aux faibles puissances
Moteur CA à bague	Récupération d'énergie	•		•		+	-	+	+	0	-	Adapté aux puissances importantes
Moteur CA asynchrone à cage	Fréquence variable	•		•	•	+	0	+	+	+	+	Applicable aux moteurs immergés et antidéflagrants Secours aisé et survitesse limitée

(D'après Jeumont-Schneider)

Point fort : + Moyen : 0 Faible : -

2. DISPOSITIFS UTILISABLES

En pompage, la variation de fréquence est la solution la plus élaborée. Rendue possible grâce à l'amélioration considérable de la technologie des composants électroniques, elle permet d'utiliser un moteur asynchrone classique. De plus, les performances fournies correspondent aux exigences du **pompage centrifuge** (couple résistant **augmentant** avec la vitesse de rotation).

Avant tout projet de pompage à vitesse variable, il conviendra de procéder à une étude technico-économique approfondie afin de connaître la rentabilité du système.

Cette étude sera basée sur les paramètres suivants :

- fluctuation du point de fonctionnement - gamme des débits couverts - conséquences sur le rendement et la puissance,
- allure de la courbe réseau,
- coût de l'énergie,
- contraintes hydrauliques (débits ou pressions imposés).

Cependant, même si la variation de vitesse n'apporte pas un gain substantiel en énergie, du fait de la courbe réseau par exemple, le système sera éminemment plus souple qu'une cascade simple; il permettra des démarrages et arrêts progressifs; en industrie, il contribuera à réaliser des asservissements multiples.



6 DEMARRAGE ET PROTECTION DES MOTEURS

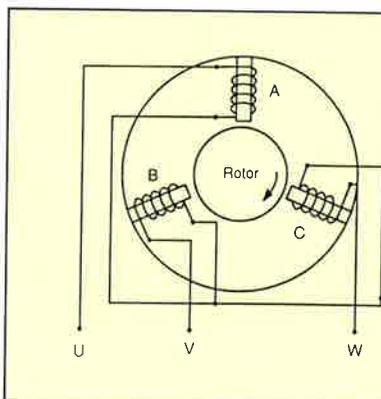
1. LES MOTEURS

L'association pompe/moteur électrique ne peut se faire sans quelques précautions, compte tenu des relations orageuses entre la plupart des liquides et l'électricité.

Pour réduire au maximum le risque de contact entre les liquides et l'électricité, l'utilisation d'un moteur fermé est très souvent la solution (obligatoire pour les pompes immergées). Mais le moteur est un récepteur qui génère des calories qu'il faut évacuer.

Parce qu'ils sont faciles à refroidir mais aussi parce qu'ils sont simples, robustes et économiques, les moteurs asynchrones entraînent la presque totalité des pompes dites électriques. Pour la gamme de puissance qui nous intéresse, on peut dire que tous les moteurs sont triphasés.

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASE



Trois enroulements ABC alimentés en triphasé constituent le stator et créent un champ tournant.

Ce champ tournant produit un flux tournant dans le rotor.

Le flux produit crée un courant dans le rotor à condition que celui-ci ne tourne pas à la même vitesse que la vitesse du flux du champ tournant.

Le couple du moteur provient de l'action du flux sur le courant dans le rotor.

Il existe deux familles de moteurs asynchrones :

- Le moteur à rotor en court-circuit ou moteur à cage. Sur ce type de moteur, l'utilisateur n'a pas accès au rotor. Le seul moyen de modifier ses caractéristiques est de modifier les caractéristiques du réseau d'alimentation. L'utilisation d'un modulateur de fréquence permet de s'affranchir de cet inconvénient. C'est le moteur le plus simple à utiliser. Il est économique, robuste et étanche, il ne nécessite pas d'entretien. Son point faible : il nécessite un fort courant au démarrage pour un couple souvent réduit. Cet inconvénient est diminué par l'utilisation d'un démarreur électronique;

- Le moteur à rotor bobiné, ou moteur à bagues. C'est le même moteur que ci-dessus sauf en ce qui concerne le rotor qui n'est pas en court-circuit mais ouvert. Par l'adjonction de résistances extérieures en série avec le rotor, on réduit l'inconvénient du courant fort au démarrage, mais on crée deux problèmes majeurs :

- moteur plus cher et nécessitant de l'entretien,
- résistances à installer et à câbler.

Ce type de moteur est aujourd'hui très peu utilisé en pompage.

Actuellement, le moteur asynchrone à cage entraîne la totalité des pompes. Ses inconvénients, caractéristiques fixes et fort courant au démarrage, sont corrigés par l'électronique.

Aussi, pour la suite, nous ne parlerons que du moteur asynchrone à cage.

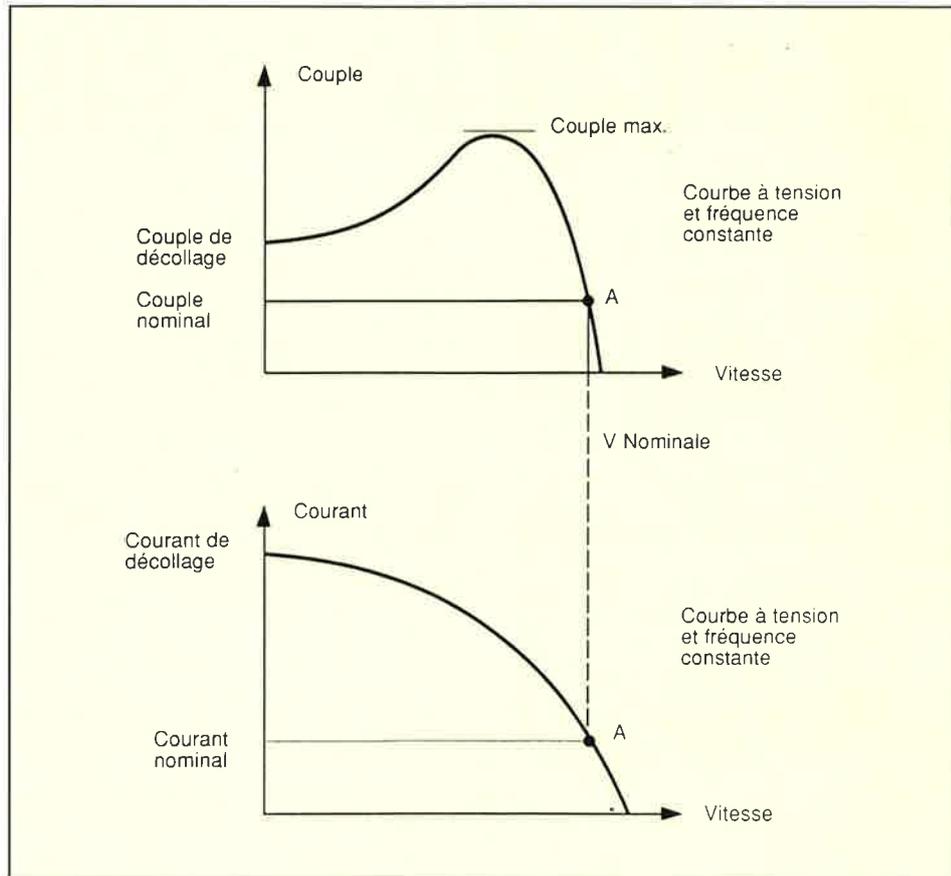
Avantages :

- simplicité : 3 fils à brancher sur le réseau triphasé,
- robustesse : pas de liaisons électriques entre la partie fixe et la partie tournante, point fragile des machines tournantes,
- standardisé,
- meilleurs rapports poids/kW - volume / kW,
- ne nécessite ni entretien ni surveillance,
- meilleur rapport prix/kW.

Inconvénients :

- appel de courant important pendant le démarrage. Cet inconvénient est réduit par l'utilisation d'un démarreur,
- pas de possibilités de réglage des caractéristiques. Cet inconvénient n'existe plus par l'utilisation d'un variateur électronique à fréquence modulable.

Caractéristiques :



Rapports couple/vitesse et courant/vitesse à tension constante.

Nota : les caractéristiques optima du moteur sont obtenues au point A; rendement, rapport courant/puissance fournie, facteur de puissance. Il faut donc que le moteur travaille à son couple nominal pour la vitesse nominale et qu'il y ait la meilleure adéquation entre une pompe et le moteur qui l'entraîne; un moteur surpuissant n'est pas intéressant au point de vue économique.

Comment évoluent ses caractéristiques quand on fait varier la tension d'alimentation ?

A fréquence constante, le couple d'un moteur est proportionnel au carré de la tension d'alimentation

$$C = KU^2$$

C'est en réduisant la tension d'alimentation à l'aide d'un artifice de démarrage (démarrateur) que l'on supprime les à-coups de couple et les fortes pointes de courant. Cette fonction est parfaitement réalisée par les démarreurs.

(Schéma 1).

Comment évolue le couple d'un moteur quand on fait varier la tension et la fréquence d'alimentation ?

2 - Courbe à tension nominale et fréquence nominale /2.

3 - Courbe à tension nominale et fréquence nominale /4.

(Schéma 2).

RELATION COUPLE-VITESSE-PUISSANCE

$$N = \frac{60 f}{p}$$

N = vitesse du moteur en tr/mn
f = fréquence du courant en Hz (50 Hz sur réseau EDF)

p = nombre de paires de pôles

$$P = C \cdot \omega$$

P = puissance moteur en W (watt)

C = couple moteur en m.N

ω = vitesse angulaire en rad/s

$$\omega = \frac{2\pi \cdot N}{60}$$

N = vitesse de rotation en tr/mn

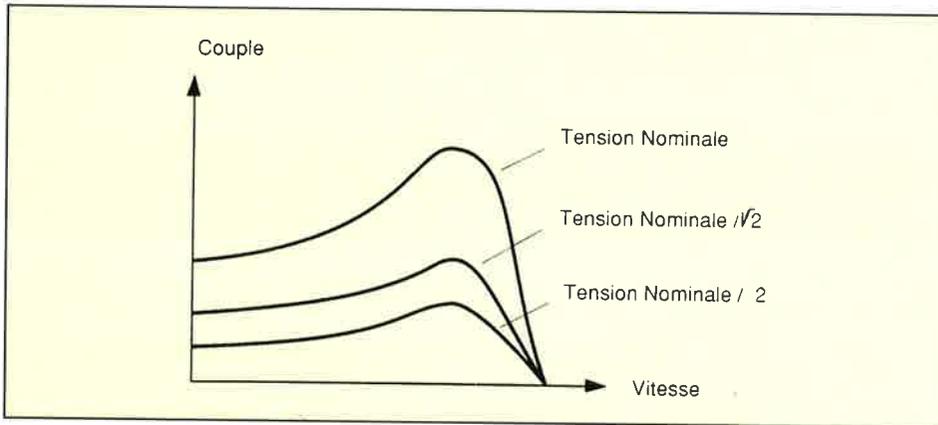


Schéma 1 : Rapport couple/vitesse, tension variable, fréquence constante.

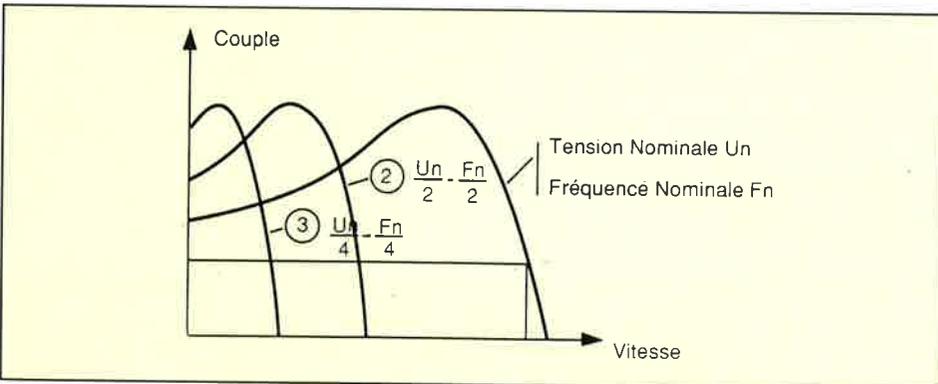


Schéma 2 : Rapport couple/vitesse, tension et fréquences variables.

2. MODES DE DEMARRAGE

1. La principale difficulté que l'utilisateur rencontre dans le choix et la mise en oeuvre d'un moteur asynchrone d'induction, ou de son appareillage, réside dans le procédé de démarrage.

Pris entre la nécessité d'obtenir un couple de démarrage suffisant pour assurer la mise en vitesse de la machine, même dans les conditions les plus défavorables, et les besoins d'éviter un à-coup mécanique et un appel de courant trop important (5 à 8 fois I_n), il doit, pour faire un choix judicieux, bien connaître toutes les possibilités qui s'offrent à lui.

2. Les avantages et inconvénients des différentes solutions

MODE	AVANTAGES	INCONVENIENTS
1. Démarrage direct	Simple Economique Couple important	Appel de courant en ligne important Démarrage brutal pour la mécanique
2. Etoile triangle	Economique Bon rapport couple/courant	Couple relativement faible. Pas de réglage - Moteur à 6 bornes Transition brutale
3. Résistances statoriques métalliques	Pas de coupure avec le réseau Réglage possible	Faible réduction du courant de ligne Résistances encombrantes Dissipation inutile
4. Autotransformateur	Bon rapport couple/courant primaire Réglage possible	Coûteux, encombrant Transitoires dangereux en reprise à la volée sur réseau perturbé
5. Moteur à 2 vitesses	Possibilité de 2 vitesses Economique	Moteur non normalisé 2 transitoires au démarrage Séquence d'arrêt nécessitant des précautions
6. Résistances statoriques liquides thermo-variables	Bonne progressivité Facile à mettre en œuvre Absence de perturbations	Nombre de démarrages restreint Maintenance importante : niveau, fuites et nettoyage des électrodes onéreux à l'exploitation Encombrant Hygiène et sécurité électrolyse (dangereux) Adapté à 1 seul moteur
7. Démarreur électrolytique à recyclage permanent	Bonne progressivité Facile à mettre en œuvre Absence de perturbations Bonne tenue à l'échauffement	Dégradation de la qualité de l'électrolyte dans le temps
8. Gradateur	Très bonne progressivité (démarrage et arrêt) Pas d'entretien Pas de dissipation inutile dans le démarreur Limitation des pointes de courant et des chutes de tension Encombrement réduit Réglages faciles	Faible couple au démarrage Génère des perturbations et des harmoniques en phase transitoire
9. Convertisseur de fréquence	Très bonne progressivité Pas de dissipation inutile ni dans le démarreur ni dans le moteur Surcouple important au démarrage Variation de vitesse	Coûteux Encombrant pour fortes puissances

DEMARRAGE DIRECT

C'est le mode de démarrage le plus simple dans lequel le stator est directement couplé sur le réseau. Le moteur démarre sur ses caractéristiques naturelles.

Au moment de la mise sous tension, le moteur se comporte comme un transformateur dont le secondaire, constitué par la cage du rotor très peu résistante, est en court-circuit. Le courant induit dans le rotor est important. Les courants primaire et secondaire étant sensiblement proportionnels, il en résulte une pointe de courant importante sur le réseau :

I démarrage = 5 à 8 I nominal

Le couple de démarrage C est en moyenne :

C démarrage = 0,5 à 1,5 C nominal

C = couple moteur

Malgré les avantages qu'il représente (simplicité de l'appareillage, couple de démarrage élevé, démarrage rapide, prix faible), le démarrage direct ne peut convenir que dans les cas où :

- la puissance du moteur est faible par rapport à la puissance du réseau, de manière à limiter les perturbations dues à l'appel de courant;

- la machine entraînée comporte un dispositif mécanique (réducteur par exemple) qui évite un démarrage trop brutal, et ne nécessite pas une mise en vitesse progressive ;

- le couple de démarrage doit être élevé.

Par contre, chaque fois que :

- l'appel de courant risque de perturber le bon fonctionnement d'autres appareils branchés sur la même ligne, ceci en raison de la chute de tension qu'il provoque;

- la machine entraînée ne peut accepter des à-coups mécaniques;

- le confort ou la sécurité des utilisateurs sont en cause (cas des escaliers mécaniques par exemple);

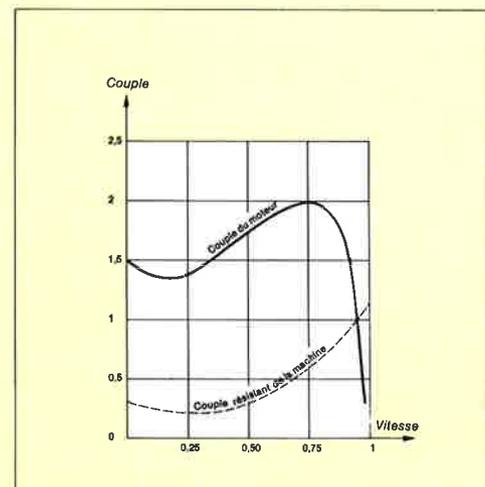
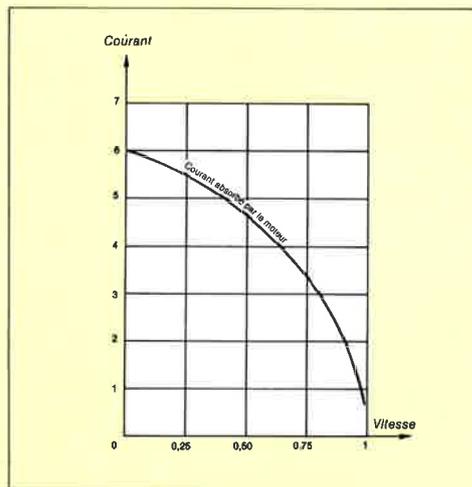
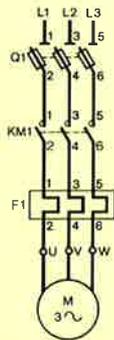
il devient nécessaire d'utiliser un artifice permettant de diminuer l'appel de courant ou le couple de démarrage.

Le moyen le plus couramment utilisé pour cela consiste à démarrer le moteur sous tension réduite. En effet, une variation de la tension d'alimentation a les conséquences suivantes :

- le courant de démarrage varie proportionnellement à la tension d'alimentation,

- le couple de démarrage varie proportionnellement au carré de la tension d'alimentation.

Exemple : si la tension est divisée par $\sqrt{3}$, le courant est sensiblement divisé par $\sqrt{3}$, et le couple est divisé par 3.



DEMARRAGE ETOILE-TRIANGLE

Ce mode de démarrage ne peut être utilisé qu'avec un moteur sur lequel les deux extrémités de chacun des trois enroulements statoriques sont ramenés sur la plaque à bornes. Par ailleurs, le bobinage doit être réalisé de telle sorte que le couplage triangle corresponde à la tension du réseau : par exemple, pour un réseau triphasé 380 V, il faut un moteur bobiné en 380 V triangle / 660 V étoile.

Le principe consiste à démarrer le moteur en couplant les enroulements en étoile sous la tension réseau, ce qui revient à diviser la tension nominale du moteur en étoile par $\sqrt{3}$

(dans l'exemple ci-dessus, la tension réseau 380 V = $\frac{660 \text{ V}}{\sqrt{3}}$).

La pointe de courant de démarrage est divisée par 3 :

$I_d \approx 1,5 \text{ à } 2,6 \text{ In}$

En effet, un moteur 380 V/660 V couplé en étoile sous sa tension nominale 660 V absorbe un courant $\sqrt{3}$ fois plus faible qu'en couplage triangle sous 380 V. Le couplage étoile étant effectué sous 380 V, le courant est divisé une nouvelle fois par $\sqrt{3}$, donc au total par 3.

Le couple de démarrage, étant proportionnel au carré de la tension d'alimentation, est lui aussi divisé par 3 : $C_d \approx 0,2 \text{ à } 0,5 C_n$

La vitesse du moteur se stabilise quand les couples moteur et résistant s'équilibrent, généralement entre 75 et 85 % de la vitesse nominale. Les enroulements sont alors couplés en triangle et le moteur rejoint ses caractéristiques naturelles. Le passage du couplage étoile au couplage triangle est commandé par un temporisateur réglable de 0 à 30 secondes. La fermeture du contacteur triangle s'effectue avec un retard de 30 à 50 millisecondes après l'ouverture du contacteur étoile, ce qui évite un court-circuit entre phases, les deux contacteurs ne pouvant être fermés simultanément.

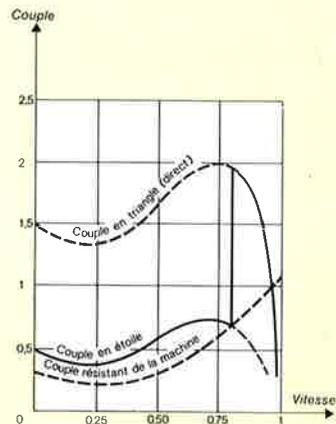
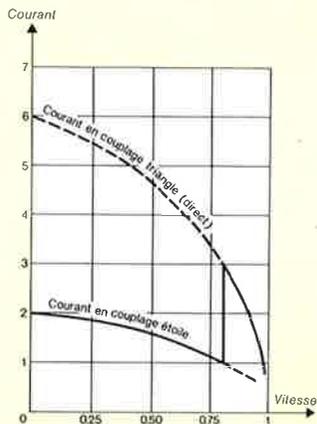
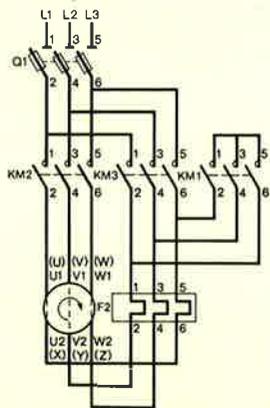
Le courant qui traverse les enroulements est interrompu à l'ouverture du contacteur étoile. Il se rétablit à la fermeture du contacteur triangle. Ce passage en triangle s'accompagne d'une pointe de courant transitoire très brève mais très importante, due à la force contre-électromotrice du moteur.

Le démarrage étoile-triangle convient aux machines qui présentent un faible couple résistant, ou qui démarrent à vide. En raison de la présence du régime transitoire au

moment du couplage triangle, il peut être nécessaire, au-delà d'une certaine puissance, d'utiliser une variante permettant de limiter ces phénomènes transitoires :

- temporisation de 1 à 2 secondes au passage étoile-triangle : cette temporisation permet une diminution de la fcm, donc de la pointe de courant transitoire. Cette variante ne peut être utilisée que si la machine a une inertie suffisante pour éviter un ralentissement trop important pendant la durée de la temporisation.
- démarrage en 3 temps étoile - triangle + résistance - triangle : la coupure subsiste, mais la résistance mise en série pendant 3 secondes environ avec les enroulements couplés en triangle permet de réduire la pointe de courant transitoire.
- démarrage étoile-triangle + résistance sans coupure : la résistance est mise en série avec les enroulements immédiatement avant l'ouverture du contacteur étoile. Ceci évite toute interruption de courant, donc l'apparition des phénomènes transitoires.

L'utilisation de ces variantes se traduit par la mise en œuvre de matériel supplémentaire, ce qui peut avoir pour conséquence une **augmentation non négligeable** du coût de l'installation. Nous verrons plus loin que l'emploi d'un **démarréur électronique** peut apporter une meilleure solution dans de nombreux cas.



Le principe consiste à démarrer le moteur sous tension réduite en insérant des résistances en série avec les enroulements. Lorsque la vitesse se stabilise, les résistances sont éliminées et le moteur est couplé directement sur le réseau. Cette opération est généralement commandée par un temporisateur.

Dans ce mode de démarrage, le couplage des enroulements du moteur n'est pas modifié. Il n'est donc pas nécessaire que les deux extrémités de chaque enroulement soient sorties sur la plaque à bornes. La valeur de la résistance est calculée en fonction de la pointe de courant au démarrage à ne pas dépasser, ou de la valeur minimale du couple de démarrage nécessaire compte tenu du couple résistant de la machine entraînée. En général, les valeurs de courant et de couple de démarrage sont :

$$I_d \approx 4,5 I_n$$

$$C_d \approx 0,75 C_n$$

Pendant la phase d'accélération avec les résistances, la tension appliquée aux bornes du moteur n'est pas constante.

En effet, cette tension est égale à la tension du réseau diminuée de la chute de tension dans la résistance de démarrage. La chute de tension est proportionnelle au courant absorbé par le moteur. Comme le courant diminue au fur et à mesure de l'accélération du moteur, il en est de même pour la chute de tension dans la résistance. La tension appliquée aux bornes du moteur est donc minimale au moment du démarrage, et elle augmente progressivement.

Le couple étant proportionnel au carré de la tension aux bornes du moteur, il augmente donc plus rapidement que dans le démarrage étoile-triangle où la tension reste fixe pendant tout le temps du couplage étoile.

Ce mode de démarrage convient donc bien aux machines ayant un couple résistant croissant avec la vitesse, comme par exemple les pompes centrifuges.

Il présente l'inconvénient d'une pointe de courant relativement importante au démarrage. Cette pointe pourrait être réduite en augmentant la valeur de la résistance, mais cela entraînerait une chute

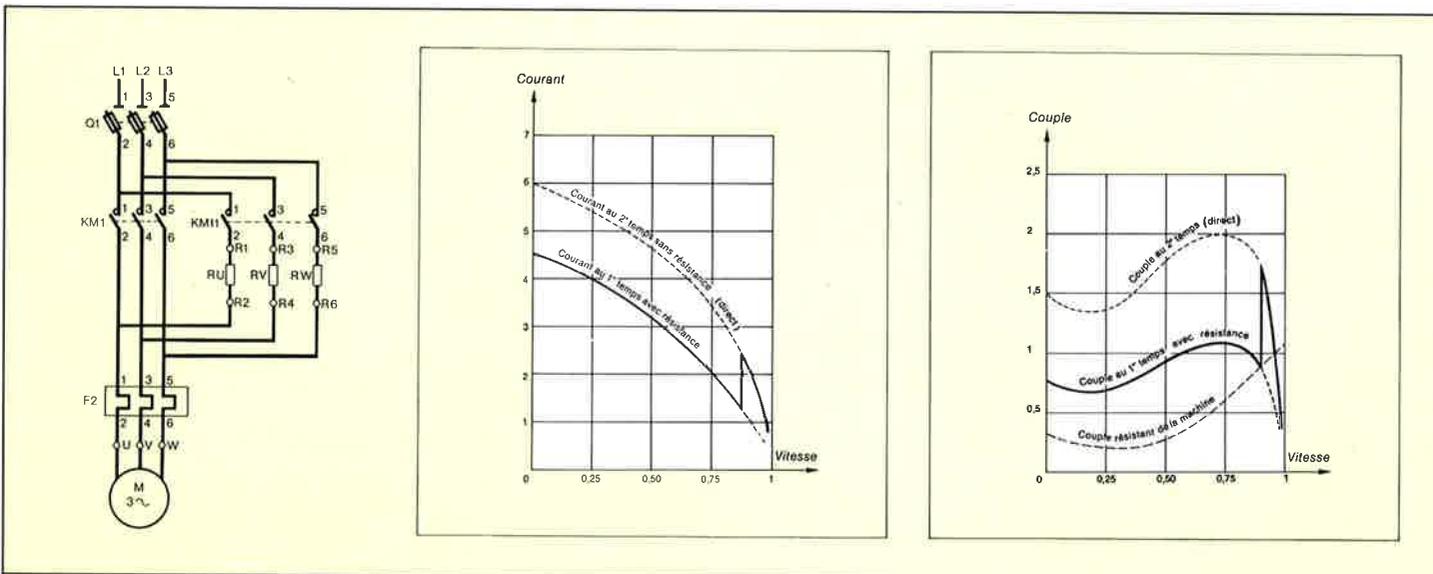
de tension supplémentaire aux bornes du moteur, et, par conséquent, une diminution importante du couple de démarrage.

Par contre, l'élimination de la résistance en fin de démarrage se fait sans qu'il y ait interruption de l'alimentation du moteur, donc sans phénomènes transitoires.

Le démarreur électrolytique à recyclage permanent :

Lors du démarrage, une résistance liquide est insérée progressivement sur chacune des phases entre le moteur et le réseau. Elle permet une montée en vitesse progressive. La fermeture du contacteur, au passage de l'intensité nominale, supprime les à-coups et rend le démarrage indépendant des conditions de charge.

La variation des concentration et débit de l'électrolyte permet d'adapter le démarreur aux conditions d'exploitation les plus variées, tout en assurant une intensité de démarrage et un couple accélérateur optimisés.



DEMARRAGE PAR AUTOTRANSFORMATEUR

Le moteur est alimenté sous tension réduite par l'intermédiaire d'un autotransformateur qui est mis hors circuit quand le démarrage est terminé.

Le démarrage s'effectue en trois temps :

- au premier temps, l'autotransformateur est d'abord couplé en étoile, puis le moteur est couplé au réseau à travers une partie des enroulements de l'autotransformateur. Le démarrage s'effectue donc sous une tension réduite qui est fonction du rapport de transformation. L'autotransformateur est généralement muni de prises permettant de choisir le rapport de transformation, donc la valeur de la tension réduite la mieux adaptée;

- avant de passer au couplage pleine tension, le point étoile est ouvert. La fraction de bobinage raccordée au réseau constitue alors une inductance en série avec le moteur. Cette opération est effectuée lorsque la vitesse d'équilibre est atteinte à la fin du premier temps (équilibre entre couple moteur réduit et couple résistant);

- le couplage pleine tension intervient après le deuxième temps généralement très court (une fraction de seconde). Les inductances en série avec le moteur sont shuntées, puis l'autotransformateur est mis hors circuit.

Le courant et le couple de démarrage varient dans les mêmes proportions. Ils sont divisés par $(U_{réseau} / U_{réduite})^2$. Les valeurs obtenues sont les suivantes :

$$I_d = 1,7 \text{ à } 4 I_n$$

$$C_d = 0,5 \text{ à } 0,85 C_n$$

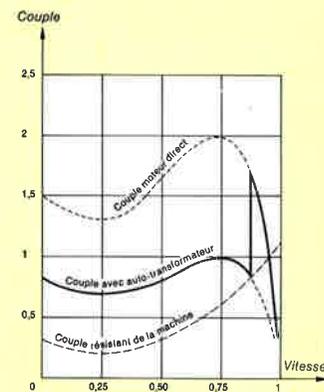
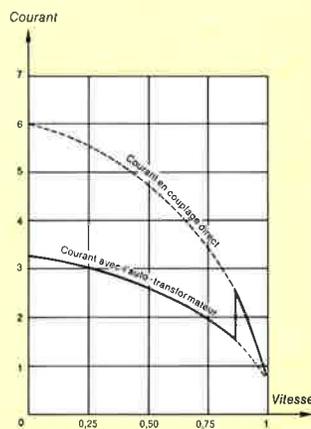
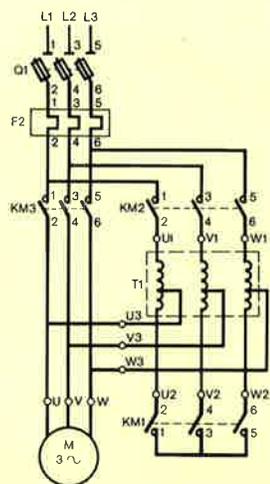
Le démarrage s'effectue sans qu'il y ait interruption du courant dans le moteur. De ce fait, les phénomènes transitoires liés à une telle interruption n'existent pas.

Par contre, des phénomènes transitoires de même nature peuvent apparaître lors du couplage pleine tension si certaines précautions ne sont pas prises. En effet, la valeur de l'inductance en série avec le moteur après ouverture de l'étoilage est grande vis-à-vis de celle du moteur.

Il s'ensuit une chute de tension importante qui entraîne une pointe de courant transitoire élevée au moment du couplage sous pleine tension. Pour pallier cet inconvénient, le circuit magnétique de l'autotransformateur comporte un entrefer dont la présence conduit à une diminution de la valeur de l'inductance. Cette valeur est calculée de telle façon qu'au moment de l'ouverture de l'étoilage au deuxième temps, il n'y ait pas de variation de tension aux bornes du moteur.

La présence de l'entrefer a pour conséquence une augmentation du courant magnétisant de l'autotransformateur. Ce courant magnétisant augmente l'appel de courant dans le réseau au premier temps de démarrage.

Ce mode de démarrage est généralement utilisé pour des moteurs de puissance supérieure à 100 kW. Mais il conduit à des équipements relativement coûteux en raison du prix élevé du transformateur.





LA PROTECTION DES MOTEURS

La protection des moteurs doit permettre :

- d'assurer au mieux la continuité de service,
- de limiter les contraintes auxquelles sont soumis les matériels :
 - contraintes électriques subies par les isolants,
 - contraintes thermiques dues aux échauffements,
 - contraintes mécaniques dues aux efforts électrodynamiques.

Tout **dépassement** de la température limite de fonctionnement conduit à une réduction de la durée de vie par vieillissement prématuré des isolants. C'est le vieillissement des isolants qui est la cause principale de la fin de vie d'un moteur électrique.

Par exemple, si le moteur travaille à une température supérieure de +10°C à ce que permet sa classe, sa durée de vie est réduite de moitié.

Les dépenses occasionnées par la protection sont étroitement liées :

- au coût de l'installation protégée,
- **au coût de l'arrêt**, si une panne moteur entraîne des arrêts répétitifs d'une partie ou de toute l'installation.

Donc, la protection des moteurs contre les anomalies d'alimentation, les incidents d'exploitation et les défauts internes est un maillon important dans un processus industriel.

La protection d'un moteur électrique doit s'inscrire dans le cadre global d'une installation industrielle en prenant en compte :

- la machine entraînée,
- l'appareillage de commande,
- le process.

PRINCIPALES CAUSES DE DEFAILLANCES DES MOTEURS

Surcharge	30%
Absence de phase	14%
Polluants	19%
Vieillessement	10%
Défaillance de paliers	13%
Défauts rotor	5%
Divers	9%

Remarques : Les surcharges thermiques et la marche en monophasé (absence de phase) atteignent 44% des causes de défaillances.

Approximativement, 80% de ces problèmes affectent les moteurs de 50 cv (37 kW) ou plus.

Base d'analyse : 9 000 cas de défaillance (selon une étude de "ELECTRICAL RESEARCH ASSN LEATHER HEAD" ENGLAND)



1. Les anomalies d'alimentation

- Une baisse de tension symétrique provoque un échauffement par augmentation du courant absorbé par le moteur; elle entraîne aussi un décrochement du moteur, un mauvais facteur de puissance ainsi qu'une diminution des pertes Fer.

- Une baisse de tension dissymétrique crée des champs tournants qui se traduisent par un couple de freinage et une élévation de température. Par exemple, *un déséquilibre en tension de 3% provoque une élévation de température supérieure à 15°C.*

1.1 Les coupures de phases

Les coupures de phases sont souvent provoquées par :

- la rupture ou le desserrage d'un conducteur actif,
- un fusible fondu,
- un pôle de contacteur n'établissant pas le contact.

1.2 Les inversions de phases

Elles entraînent la mise en rotation inverse de l'ensemble moteur-machine. Si, pour le moteur, cela n'entraîne aucun phénomène néfaste, il n'en est pas de même pour la machine entraînée; cela peut provoquer des dégâts considérables (casse du matériel, arrêt du transfert des liquides, dévissage d'arbre de transmission, etc.).

2. Les incidents d'exploitation

Parmi les nombreux incidents d'exploitation, dépendant du process, on peut relever :

- les démarrages trop longs,
- les blocages du rotor,
- les surcharges,
- les sous-charges (désamorçage de pompe)

2.1 Les démarrages trop longs

Le courant rotorique d'un moteur asynchrone est de l'ordre de 8 fois le courant nominal à la mise en route. Il décroît en fonction du temps de la montée en vitesse pour atteindre une valeur stable à la vitesse normale pour une charge donnée.

Le temps de démarrage maxi, indiqué par le constructeur, dépend de la puissance du moteur et de l'inertie des masses tournantes du rotor et des machines entraînées. Si le démarrage s'effectue normalement, l'échauffement du rotor reste dans les limites définies. Mais, si le démarrage est trop long, si le rotor est bloqué par la machine, si le glissement devient trop grand par diminution du couple moteur (chute de tension) ou par augmentation du couple résistant, vanne ouverte pour la pompe centrifuge, vanne fermée pour la volumétrique, les enroulements du moteur peuvent être détruits si le moteur n'est pas séparé rapidement du réseau.

2.2 Les blocages du rotor

Un blocage de rotor produit un appel de courant qui atteint le courant de démarrage. Ce courant ne peut être supporté par le moteur que pendant un temps très court.

2.3 Les surcharges

Les surcharges du moteur sont d'origine mécanique et/ou électrique et touchent la machine entraînée et/ou le moteur lui-même. La surintensité qui en résulte risque de dégrader l'isolement du bobinage par excès d'échauffement.

On peut protéger efficacement les moteurs avec des sondes incorporées (thermistances).



7 DEMARREUR RALENTISSEUR ELECTRONIQUE

On l'utilisera chaque fois qu'il est nécessaire de :

- Réduire les pointes d'intensité et diminuer les chutes de tension en ligne;
- Limiter le couple de démarrage et protéger la mécanique;
- Accélérer, décélérer ou freiner en douceur, pour la sécurité des personnes ou objets transportés;
- Démarrer progressivement les machines à forte inertie;
- Commander des machines à démarrages fréquents;
- Piloter successivement plusieurs moteurs avec un seul démarreur.

DEMARRAGE PAR TENSION VARIABLE ET LIMITATION DU COURANT

Lois de commande d'un moteur asynchrone à cage

La figure 1 montre la caractéristique couple/vitesse d'un moteur à cage en fonction de la tension d'alimentation. Le couple varie comme le carré de la tension à fréquence fixe. La montée progressive de la tension limite le couple et le courant au démarrage, et supprime la pointe d'intensité instantanée à la mise sous tension.

La figure 2 montre l'évolution couple en fonction de l'intensité de démarrage. La limitation du courant de démarrage I_d à une valeur prédéterminée I_{d1} provoque une réduction du couple de démarrage C_{d1} pratiquement égale au rapport du carré des courants I_d et I_{d1} . (Voir exemple)

DEMARRAGE PAR VARIATEUR ELECTRONIQUE

Caractéristiques générales

Courant de démarrage réglable de 2 à 5 fois le courant nominal, d'où un couple de démarrage variable de 0,15 à 1 fois le couple nominal.

Rampes d'accélération et de décélération à réglages indépendants.

Arrêt freiné par injection de courant continu.

Moteur 3 bornes, puissance 1,5 à 800 kW.

Appareil sans entretien.

Réglage des paramètres.

LE DEMARRAGE ELECTRONIQUE

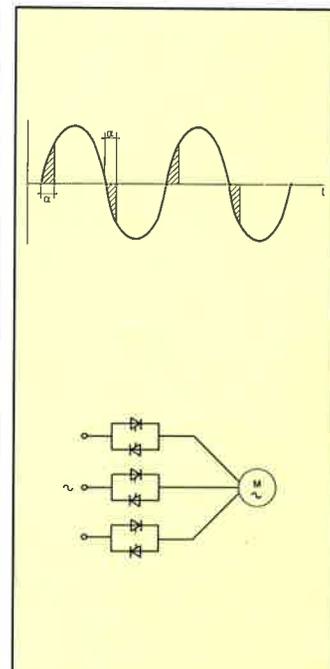
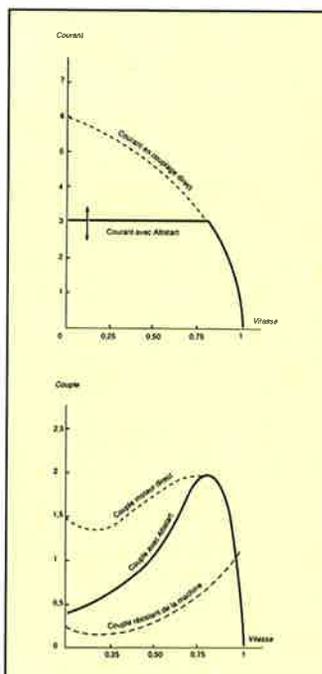
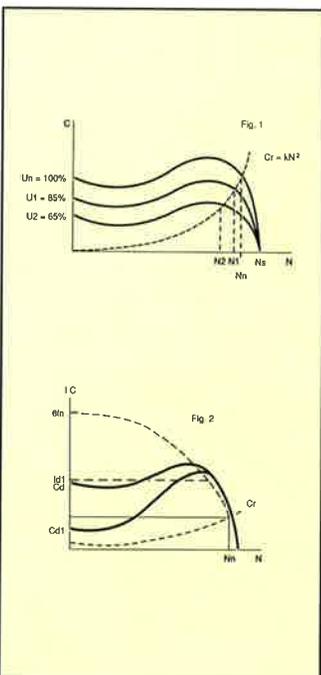
L'alimentation du moteur asynchrone triphasé par montée progressive de la tension au démarrage est obtenue par l'intermédiaire d'un gradateur dont le circuit se compose de 6 thyristors, montés tête-bêche par 2 dans chaque phase du réseau. Il permet, en fonction de l'instant et de l'angle d'amorçage des thyristors, de délivrer une tension qui augmente progressivement à fréquence fixe. La montée progressive de la tension de sortie peut être, soit contrôlée par la rampe d'accélération, soit asservie à la valeur du courant de limitation, soit liée à ces deux paramètres.

EXEMPLE



Exemple : Sur un moteur dont les caractéristiques sont $C_d = 2 C_n$ pour $I_d = 6 I_n$, prenons un courant de démarrage limité à $3 I_n$. Le rapport de réduction du couple C_d sera :

$$\left(\frac{I_{d1}}{I_d}\right)^2 = \left(\frac{3}{6}\right)^2 = 0,25 \text{ soit un couple de démarrage } 2 C_n \times 0,25 = 0,5 C_n$$



8



VARIATEUR DE VITESSE PAR MODULATION DE FREQUENCE

(Convertisseur de fréquence)

Le moteur est alimenté par une onde de tension d'amplitude et de fréquence variables. Les créneaux de tension ont une amplitude constante, mais ils sont découpés afin d'obtenir la tension moyenne désirée.

CONSTITUTION : Le redresseur à diodes fournit une tension maximale fixe.

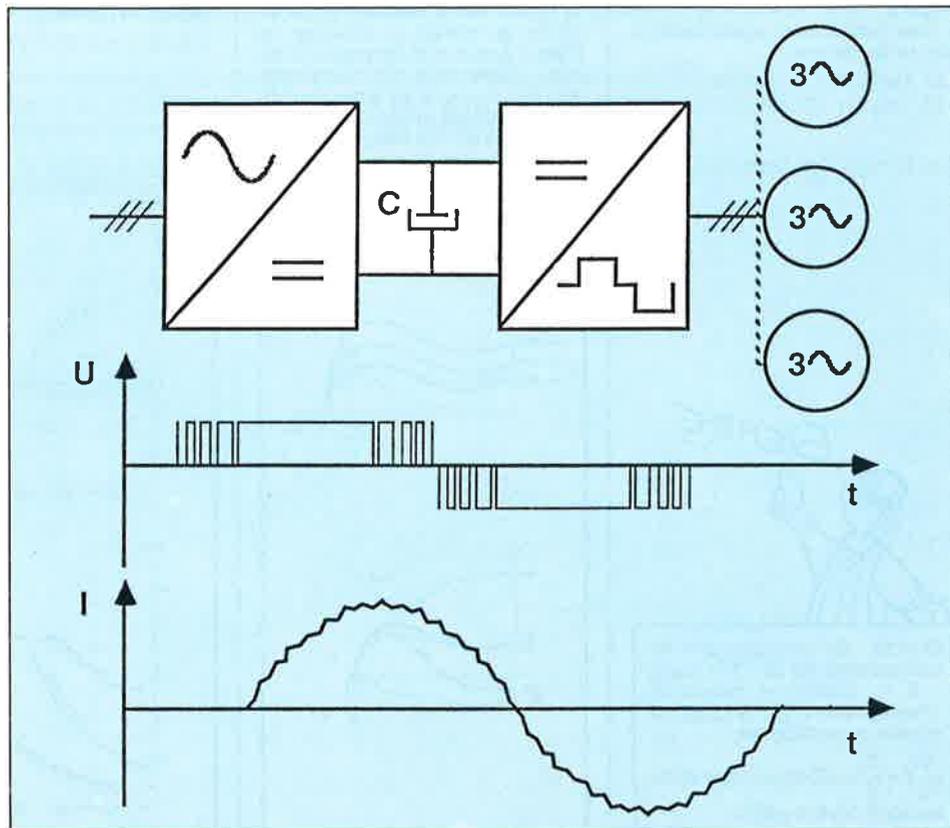
Le filtrage est réalisé par une capacité.

L'onduleur fournit la tension et la fréquence variables.

Ces convertisseurs de fréquence ne peuvent restituer de l'énergie au réseau à cause de leur redresseur fixe.

Il y a disparition du bruit du variateur, mais apparition du bruit électrique moteur en raison du découpage à fréquences élevées. Les vibrations des tôles du circuit magnétique du moteur entraînent des sons désagréables, car la fréquence de découpage est audible. A une fréquence de découpage supérieure à 15 kHz, le bruit n'est plus audible, mais les vibrations peuvent entraîner une mise à la masse des enroulements statoriques, si le serrage des tôles est insuffisant.

Les pointes de courant limitent les basses vitesses à 5 Hz et imposent des déclassements importants.





9 LEXIQUE

Fréquence : 50 Hz ou 50 périodes par seconde :

La fréquence (f) d'un courant périodique est le nombre de fois où le courant se reproduit identiquement à lui-même en une seconde.

Elle est produite par un alternateur, dépend du nombre de pôles, et de la vitesse du rotor de l'alternateur. En France, le réseau national est de 50 Hz, aux Etats Unis de 60 Hz.

Couple :

Le couple (C) est un terme difficile à mesurer car il est invisible ; un couple (C) sur l'arbre moteur est, en terme élémentaire, l'effort de "torsion" qu'il fournit. Le couple est mesuré dans le système international en mètre-Newton (mN). Il est fréquemment mesuré en m.kgf

Le couple - en mécanique - est un système composé de deux forces égales, opposées et parallèles, appliquées sur deux points différents d'un même corps.

Courant de démarrage (Id) :

Lorsque le courant est établi dans les enroulements du stator, le rotor est immobile. Le moteur fonctionne comme un transformateur dans lequel le primaire est sous tension, mais dont le secondaire est en court-circuit. L'intensité du courant qui traverse les enroulements statoriques est alors la plus forte que l'on puisse relever pour la tension et la fréquence considérées.

A la vitesse 0, l'intensité absorbée est égale à Id (Intensité de démarrage), mais elle décroît rapidement, lorsque la vitesse augmente, pour devenir égale à Iv (Intensité

à vide). On désigne l'intensité de démarrage, non pas par sa valeur en Ampère, mais par le rapport Id/In. En règle générale, le Id/In atteint couramment des valeurs de 4 à 8 (Id ne dépend pas de la charge du moteur).

Courant nominal (In) :

C'est l'intensité du courant absorbée par le moteur lorsqu'il est en rotation et travaille dans les conditions normales pour lesquelles il a été conçu.

Pôles :

Le nombre de paires de pôles (P) dont dépend la vitesse du moteur ($N = \frac{f}{P}$)

se décide lors de sa construction. On multiplie les bobinages et les couples de telle sorte qu'à chaque période du courant, le champ ne tourne plus que d'un demi-tour (moteur 4 pôles), un tiers de tour (moteur 6 pôles) etc.

Thyristor :

Le thyristor est un élément semi-conducteur en silicium. La faculté que possède le thyristor de pouvoir passer de l'état bloqué à l'état conducteur, sous l'effet d'un petit signal de commande, est, sans conteste, l'une de ses caractéristiques les plus intéressantes.

Le thyristor joue le rôle d'un interrupteur.

Il permet, dans un convertisseur de fréquences, de moduler la fréquence du courant

10 INDEX

Anomalie d'alimentation	36
Anti-bélier	23
Coup de bélier	22
Coup de clapet	23
Couple résistant	18
Courbes caractéristiques	17
Défaillance des moteurs	35
Démarrage direct	31
Démarrage étoile-triangle	32
Démarrage par autotransformateur	34
Démarrage statorique	33
Démarrage vanne fermée	19
Démarrage vanne ouverte	20-21
Démarreur électronique	37
Démarreur ralentisseur	37
Incident d'exploitation	36
Vannage	24
Vitesse de rotation	29
Vitesse spécifique	16
Vitesse variable	24-26-28

Telemecanique **ALTIVAR 45 2**

La sécurité d'entraînement

ALTIVAR 45 2 bénéficie des efforts de développement de **Telemecanique** dans la recherche de performances :

- contrôle de flux
- surcouple important sans réglage
- couple immédiatement disponible

ALTIVAR 45 2 assure une complète disponibilité de votre mécanique en proposant :

- démarrage avec rampe en S
- limitation de couple
- arrêt roue libre
- rattrapage à la volée sans à-coup etc...



LA REPONSE A VOTRE APPLICATION

Fort de l'expérience acquise dans le domaine des convertisseurs de fréquence, **Telemecanique** offre avec **ALTIVAR 45 2**, par la configuration de nouveaux paramètres et un nombre accru d'entrées sorties affectables, la réponse directe à vos applications :

- convoyage
- manutention rapide
- levage vertical
- machines à forte inertie
- pompes centrifuges etc...



Telemecanique - Direction Commerciale France - 43/45, bd F.-Roosevelt - 92500 Rueil-Malmaison - France



UNE COMMUNICATION DIVERSIFIEE

ALTIVAR 45 2 a été conçu pour s'intégrer aux architectures d'automatismes :

- programmable par console FTX 507 ou micro ordinateur compatible
- intégrable aux réseaux industriels (UNITELWAY , MODBUS)

Son approche novatrice du dialogue homme machine assure une exploitation conviviale grâce notamment à :

- la visualisation des messages en clair
- le dialogue en 6 langues
- la recopie des configurations et des réglages sur disquette.



Telemecanique **ALTISTART 3**

La sécurité d'installation

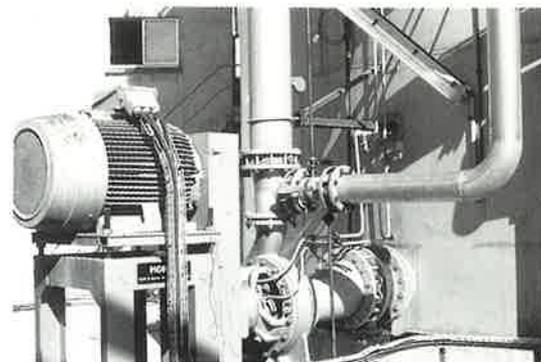
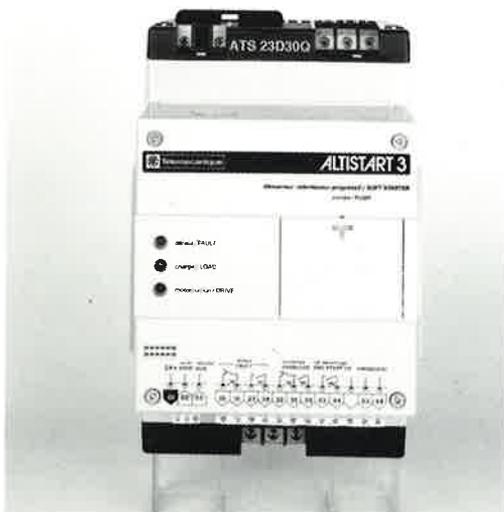
pompe

Les différents problèmes rencontrés dans les installations de pompage, et notamment les chocs hydrauliques (coups de bélier, coups de clapet...)

occasionnent des incidences graves :

- risque de rupture des tuyaux
- déboîtement ou aspiration des joints
- implosion des conduites

Le tout conduisant à une usure prématurée des équipements.



Pour éviter ces problèmes, **Telemecanique** propose son démarreur **ALTISTART 3 pompe** dédié aux installations hydrauliques.

ALTISTART 3 pompe assure en plus la protection des moteurs :

- contre la marche à vide (sous-charge)
- contre les échauffements (protection thermique intégrée), et permet avec un seul produit, la commande en cascade de plusieurs pompes.

En limitant la puissance au démarrage, **ALTISTART 3 pompe** procure des économies substantielles sur la distribution électrique.

ALTISTART 3 *pompe*



SERIE BLEUE	SERIE VERTE	A PARAÎTRE	HORS-SERIE
<p>1 65 F LES POMPES CENTRIFUGES Entretien et maintenance.</p> <p>2 65 F Techniques et méthodes de RECHERCHE ET DETECTION DES FUITES dans les réseaux d'adduction d'eau.</p> <p>3 65 F L'utilisation des REACTIFS DE TRAITEMENT D'EAU POTABLE et le contrôle de leur mise en œuvre.</p> <p>4 65 F Utilisation et entretien des INSTRUMENTS DE MESURE dans le contrôle de la qualité des eaux.</p> <p>5 65 F La distribution de l'eau potable : LE COMPTAGE.</p> <p>6 65 F LA ROBINETTERIE Choix - Mise en œuvre - Entretien.</p> <p>7 65 F RESEAUX D'ASSAINISSEMENT Conception - Réception - Entretien - Réhabilitation.</p> <p>8 65 F Eaux usées urbaines : NITRIFICATION DENITRIFICATION DEPHOSPHATATION Contraintes d'exploitation.</p>	<p>9 75 F L'OZONATION DES EAUX Principe, exploitation et maintenance des installations.</p> <p>10 75 F LA CHLORATION DES EAUX Principe, exploitation et maintenance des installations.</p> <p>11 75 F LA TELEGESTION DES RESEAUX Principes, matériels et équipements, exploitation.</p> <p>12 100 F POSE DES CANALISATIONS pour l'adduction et la distribution de l'eau potable.</p> <p>13 75 F POMPES A MOTRICITE HUMAINE Principes Critères de choix Fiches de produits.</p> <p>14 75 F L'EAU d'alimentation des GENERATEURS DE VAPEUR Traitement et conditionnement.</p> <p>15 75 F LES POMPES : DEMARRAGE, ARRET. VARIATION DE VITESSE.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • LE DIOXYDE DE CHLORE • LA GESTION DES SERVICES 	<ul style="list-style-type: none"> • QU'EST-CE QUE L'EPURATION (A paraître)

15 **LES POMPES : DEMARRAGE, ARRET. VARIATION DE VITESSE.**

Réalisé avec le concours de :
Moussa KEBABI . Office International de l'Eau
Alain PRADEAU . Office International de l'Eau
Jean-Claude CHAZELON . Communication Graphisme, Limoges