

Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche et des Affaires rurales

FNDAE n° 27
Document technique



Florent Guhl



Groupement de Bordeaux
UR Ouvrages et réseaux hydrauliques
50, avenue de Verdun
Gazinet – 33612 Cestas Cedex
Tél. 05 57 89 08 01



Ce guide est la synthèse d'un travail collectif associant :

MM. Jean-Louis GAGNON et Olivier TRIDON de Vivendi Water

M Frédéric EVIN de Diadème Ingénierie

M. Claude FRANGIN de Eau-Service-Projet

M. Jean-Marie MATRINGE de Charlatte

MM. Bernard BREMOND et Patrick EISENBEIS du Cemagref (groupement de Bordeaux)

À différentes étapes de la réalisation de ce guide, la validation du contenu a également été soumise à :

M. Jean ANDRE, Direction de l'espace rural et de la forêt au ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche et des Affaires rurales (MAAPAR)

M. Emile ROCHE, Conseil Général du GREF au MAAPAR

Crédit photographique

Couverture – Bernard Brémond, 2000, Cemagref.

p. 3, 7, 21, 29 et 31 – Bernard Brémond, 2000, Cemagref.

© Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche et des Affaires rurales – ISBN 2-11-092854-9 ; © Cemagref 2002– Cemagref Éditions – ISBN 2-85362-596-6 Guide méthodologique d'études anti-bélier pour les réseaux d'eau. Florent Guhl (Cemagref) – Document technique FNDAE n° 27, 2002.

1^{re} édition coordonnée par le Cemagref : conception et création graphique : Julienne Baudel ; infographie : Françoise Peyriguer. Dépôt légal : 2^e trimestre 2002 – Document disponible sous forme numérique sur le site <http://www.eau.fndae.fr>. Pour les tirages papier, les demandes sont à adresser au Cemagref, DSIC /IST, Parc de Touvoie, BP 44, 92163 Antony Cedex. Tél. 01 40 96 62 85, fax. 01 40 96 61 64.



guide est destiné aux ingénieurs ou techniciens chargés soit de préciser le cadre d'une étude anti-bélier, soit de réaliser cette étude, soit de diagnostiquer une protection anti-bélier déjà réalisée. Il a deux objectifs :

- donner un cadre à l'élaboration d'un cahier des charges pour la réalisation d'une étude de protection anti-bélier, afin de bien préciser les hypothèses de départ à prendre en compte (les données de base du calcul ainsi que les niveaux de sécurité à respecter) et d'éviter ainsi toute ambiguïté dans les résultats des calculs,
- aider à la mise en œuvre d'une étude anti-bélier et à la présentation des résultats

Ce document est composé de deux parties :

- une première partie, dans laquelle sont présentés, de manière la plus complète possible, les différents points à prendre en compte lors d'une étude anti-bélier,
- une deuxième partie, dans laquelle sont présentés des exemples de calculs anti-bélier, qui, en fonction des hypothèses de départ et des objectifs, peuvent donner des résultats contradictoires.

Ce document a donc un objectif pratique de mise en œuvre d'une étude anti-bélier et n'a pas la prétention de définir à nouveau les méthodes de calcul anti-bélier. En cas de besoin, le lecteur se référera au document de Maurice Meunier, intitulé «Les coups de bélier et la protection des réseaux d'eau sous pression» dont la première édition est de décembre 1980.

Rappelons les objectifs d'une étude anti-bélier :

- déterminer les pressions minimales et maximales pouvant survenir sur un réseau d'eau, à la suite d'une manœuvre ou d'un événement exceptionnel (coupure ou rupture de l'alimentation électrique par exemple),

– définir les éléments à mettre en place afin que les pressions restent dans les limites des pressions minimales et maximales admissibles au niveau des canalisations et des différents organes qui composent le réseau.



CHAPITRE I – COMPOSANTES D’UNE ÉTUDE ANTI-BÉLIER	p. 7
LE CADRE NORMATIF ET CONTRACTUEL	p. 7
SPÉCIFICATION DES RÉGIMES TRANSITOIRES ÉTUDIÉS	p. 8
LES DONNÉES	p. 9
LES CALCULS	p. 17
CHAPITRE II – CAS ILLUSTRATIFS	p. 21
CAS N° 1 : OUVERTURE ET FERMETURE D’UNE ALIMENTATION GRAVITAIRE	p. 21
CAS N° 2 : PROTECTION D’UNE SÉRIE D’IMMEUBLES SITUÉS ENTRE UNE STATION DE POMPAGE ET UN RÉSERVOIR D’ÉQUILIBRE	p. 25
ANNEXE	p. 29



Le cadre normatif et contractuel

Une étude anti-bélier doit se conformer à un cadre réglementaire et contractuel. Ce cadre est défini par différents textes ainsi que par les prescriptions du maître d'ouvrage.

LES TEXTES DE RÉFÉRENCE

Quatre textes s'imposent à des degrés divers.

- Le fascicule n° 71 intitulé « Fourniture et pose de canalisation d'eau, accessoires et branchements » et en particulier l'article 32.4 « Prescriptions spéciales aux appareils anti-bélier »;

- Le fascicule n° 73 (en cours de révision) intitulé « Équipement hydraulique, mécanique et électrique des stations de pompage d'eaux d'alimentation et à usages industriels ou agricoles » et en particulier les articles 14 « Protection du réseau » et 50.3 « Essais et épreuves » ainsi que son annexe A, paragraphe 3 et 4 ;

- Le fascicule n° 81 Titre 1^{er} (en cours de révision) intitulé « Construction d'installations de pompage pour le relèvement ou le

refoulement des eaux usées, d'effluents industriels ou d'eaux de ruissellement ou de surface » et en particulier ses articles 15 et 53.3 ainsi que son annexe A, paragraphes 3 et 4.2 ;

- La norme NF EN 805 intitulée « Alimentation en eau – Exigences pour les réseaux extérieurs aux bâtiments et leurs composants ».

LE CADRE PROPOSÉ PAR LE MAÎTRE D'OUVRAGE

Le Cahier des clauses techniques particulières, établi par le maître d'ouvrage, permet de préciser le cadre de l'étude anti-bélier. Il doit contenir :

- les données et prescriptions concernant les éléments du réseau,

- les phénomènes à l'origine de l'éventuel coup de bélier,

- les étapes de l'étude, avec éventuellement, dans le cas de réseaux neufs, des retours sur le calcul, une fois que le maître d'œuvre aura bien précisé les équipements finalement retenus (type de pompe ou matériaux de canalisation, par exemple).



Spécification des régimes transitoires étudiés

Le but est de détailler les données techniques du cahier des charges concernant l'étude à mener. Il s'agira d'étudier et de définir le ou les régimes initial(aux), puis d'examiner les différents scénarii pouvant provoquer des phénomènes transitoires.

LES RÉGIMES PERMANENTS INITIAUX

Le régime permanent initial doit correspondre au régime permanent le plus défavorable pour l'étude du régime transitoire. Ce régime permanent initial étudié peut être différent de celui observé lors de la période de pointe de consommation. De plus, la configuration la plus défavorable pour obtenir l'enveloppe des pressions minimales peut être différente de celle qui conduit à l'enveloppe des pressions maximales.

Le régime permanent initial dépendra de la configuration du réseau et des éléments qui le composent. Par exemple, en cas d'existence d'un réservoir, la cote initiale retenue sera le niveau bas du réservoir, si le phénomène transitoire risque d'entraîner une baisse de pression.

Lorsqu'il est incertain de choisir ce régime permanent initial le plus défavorable, il sera nécessaire d'étudier plusieurs régimes permanents.

On indiquera également si le régime permanent est susceptible d'évoluer dans le temps avec l'éventuelle évolution de la capacité de production du réseau (mise en route de tranches supplémentaires sur une station de pompage par exemple), avec la dégradation dans le temps du matériel (évolution des rugosités des conduites, par exemple) ou avec la fluctuation de la demande.

Les données concernant les régimes permanents sont les mêmes que lors d'une étude hydraulique simple :

– pour les pompes : la courbe caractéristique complétée si possible par des points de mesure

permettant d'actualiser cette courbe,

– pour les canalisations : le matériau, le diamètre intérieur, le coefficient de rugosité et la longueur,

– pour les points de consommation : les débits moyens de consommation ainsi que la modulation de ces débits,

– pour les réservoirs : la cote du plan d'eau et le mode d'alimentation (ainsi que la cote de surverse le cas échéant),

– pour les autres organes : le coefficient de perte de charge qu'ils engendrent.

Comme dans tout calcul de régime permanent, il sera nécessaire, pour les installations existantes, de s'assurer du calage des résultats sur la réalité. La phase de calage se fera à partir de mesures de terrain.

L'ORIGINE DU PHÉNOMÈNE TRANSITOIRE

Une fois le régime permanent connu, il est nécessaire de définir les événements qui peuvent être à l'origine d'un éventuel coup de bélier. Nous rappelons ici que le présent guide ne s'intéresse qu'aux coups de bélier survenant sur un réseau en fonctionnement. En particulier, nous ne nous intéressons pas, dans ce guide, au régime transitoire ayant lieu lors de la mise en eau (ou de la remise en eau après arrêt) d'un réseau sous pression. Les conséquences d'une mise en eau mal effectuée peuvent être aussi importantes que celles résultant d'un coup de bélier. Cette mise en eau devra être donc faite dans les règles de l'art. Ces règles ne seront pas rappelées ici. De la même façon, ce guide ne prend pas en compte les phénomènes transitoires résultant d'une interaction entre un appareil et le réseau (ex : battement, coup de clapet, ...).

Nous distinguons donc les cas de coups de bélier suivants :

- incident (notamment électrique) provoquant l'arrêt de la pompe ou l'arrêt simultané de plusieurs pompes,
- mise en marche d'une ou plusieurs pompe(s),

- ouverture ou fermeture d'un robinet d'isolement.

Dans certains cas, on tiendra compte de manœuvres liées au domaine privé. Il s'agit des gros consommateurs, type industriel ou agricole, ou des immeubles qui possèdent un surpresseur. Cependant les conséquences de ces manœuvres devront donner lieu à l'établissement de protections locales.

Il faudra préciser s'il est nécessaire d'examiner la simultanéité de ces événements. Par exemple, ce sera le cas lorsque plusieurs stations de pompage se trouvent alimentées par le même poste électrique, une coupure engendrant alors l'arrêt simultané de ces stations.

Dans le cas d'installations existantes, il est nécessaire de décrire, le cas échéant, les protections anti-bélier existantes.

Les données

LES DONNÉES COMMUNES À TOUTES LES ÉTUDES

Dans tous les cas, il faut connaître :

- la fonction principale du réseau et la nature du fluide transporté : eau potable (transport ou distribution), eaux brutes, eaux usées...

- les données topologiques du projet. Dans le cas d'installations existantes, il faut connaître le profil en long précis de la conduite (localisation des points hauts même si ceux-ci ne nécessitent pas de protection jusqu'alors) ainsi que son diamètre intérieur ;

- la localisation, le type et la valeur des demandes de consommation dans le cas d'un réseau de distribution d'eau potable, d'eaux brutes ou d'irrigation ;

- les pressions maximales et minimales admissibles des conduites. Elles sont déterminées en tenant compte des caractéristiques des canalisations mais aussi des joints entre ces canalisations (joints mécaniques ou élé-

ments soudés). Le choix des pressions minimales admissibles dépendra également de la nature du fluide transporté. On s'interdira par exemple de tolérer toute pression minimale admissible inférieure à 0 dans une conduite d'eau potable, vu le risque de contamination dans ce cas (conformément à la réglementation sanitaire). On peut se reporter à l'annexe A, paragraphe 3, du nouveau fascicule 73 définissant, dans différents cas, les valeurs de pressions minimales acceptées ;

- la rugosité des différentes canalisations,
- la célérité de propagation des ondes dans chaque canalisation. Si cette valeur est difficile à obtenir (en particulier, pour les conduites anciennes) il est préférable de majorer la valeur communément admise pour le matériau constituant la conduite,
- les contraintes de disponibilité des installations (possibilité de se passer d'une partie des débits pour des opérations de maintenance).

LES ÉQUIPEMENTS

On peut trouver, sur un réseau, différents équipements, recensés dans les paragraphes suivants, dont les caractéristiques sont à connaître pour une étude de protection anti-bélier. Il peut s'agir également d'équipements projetés qui seront installés lors de la mise en œuvre du projet. Dans ce cas, il faudra tenir compte *in fine* des équipements réellement retenus avant de conclure l'étude de régime transitoire.

En général, les données nécessaires au calcul sont fournies dans les fiches techniques des équipements. Si la marque et le type des équipements projetés ne sont pas encore connus au moment de l'étude, les hypothèses nécessaires à l'exécution des calculs devront être validées une fois toutes les données connues. On s'attachera alors à bien vérifier les calculs une fois toutes les données connues.

Nous ferons l'hypothèse pour l'ensemble de ces équipements qu'il n'y a pas de phénomènes de dégazage. Cette hypothèse signifie que l'écoulement à considérer dans le réseau sera monophasique (composé d'eau en l'absence d'air).

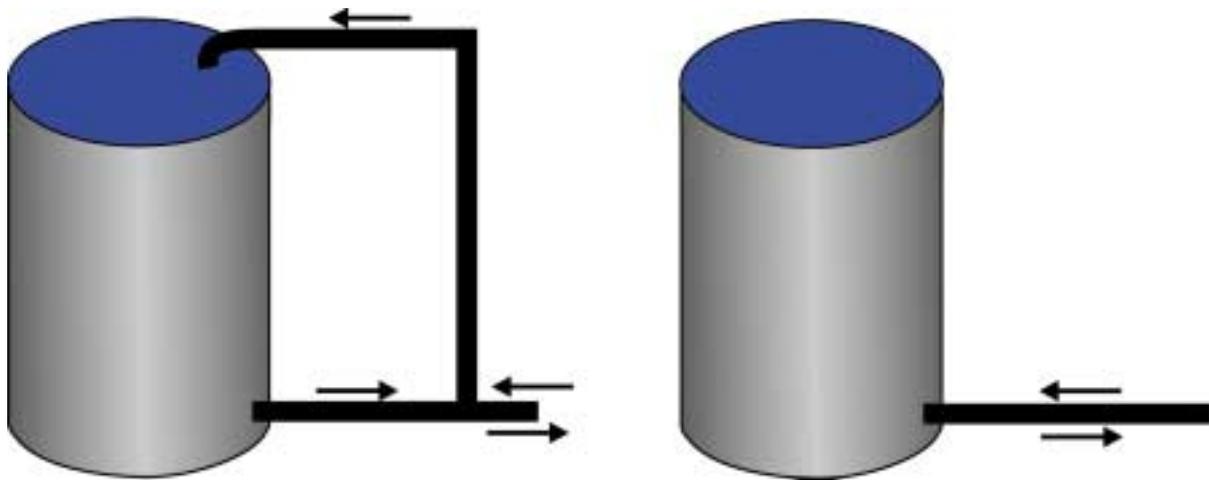


Figure 1 – Types d'alimentation d'un réservoir

10

Arrêt de la 1^{ère} pompe ———

Arrêt de la 2^e pompe ———

Mise en route de la 1^{ère} pompe ———

Mise en route de la 2^e pompe ———

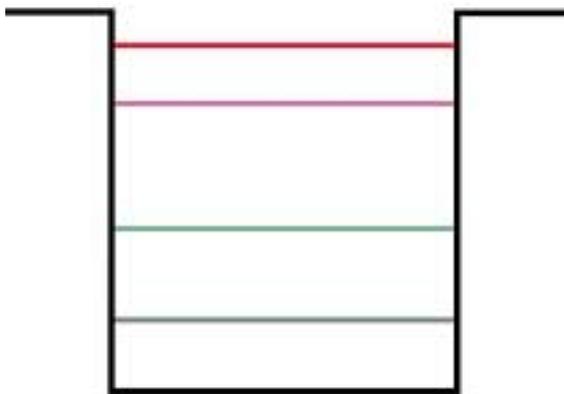


Figure 2 – Exemple d'indexation de pompes sur les niveaux dans un réservoir

LES RÉSERVOIRS

Le premier élément à préciser est le type d'alimentation du réservoir (cf. figure 1).

Si l'alimentation ou la sortie du réservoir se fait par le fond, il est nécessaire de connaître les niveaux extrêmes de variation de l'eau dans celui-ci. Il peut s'agir des niveaux radier et trop-plein ou des niveaux haut et bas de poires de contact pour la mise en route d'une pompe. En cas de surverse, il faut connaître la cote de cette surverse.

S'il existe plus de deux poires de contact enclenchant successivement plusieurs pompes, il faut connaître les associations niveau dans le réservoir/nombre de pompes comme sur l'exemple représenté à la figure 2.

On formulera une hypothèse sur le niveau dans chacun des réservoirs correspondant aux scénarii et aux régimes permanents retenus au paragraphe «Spécification des régimes transitoires étudiés ».

En fonction des équipements rencontrés dans la chambre de vannes attenantes au réservoir, il est utile d'évaluer les pertes de charge singulières à l'entrée et à la sortie.

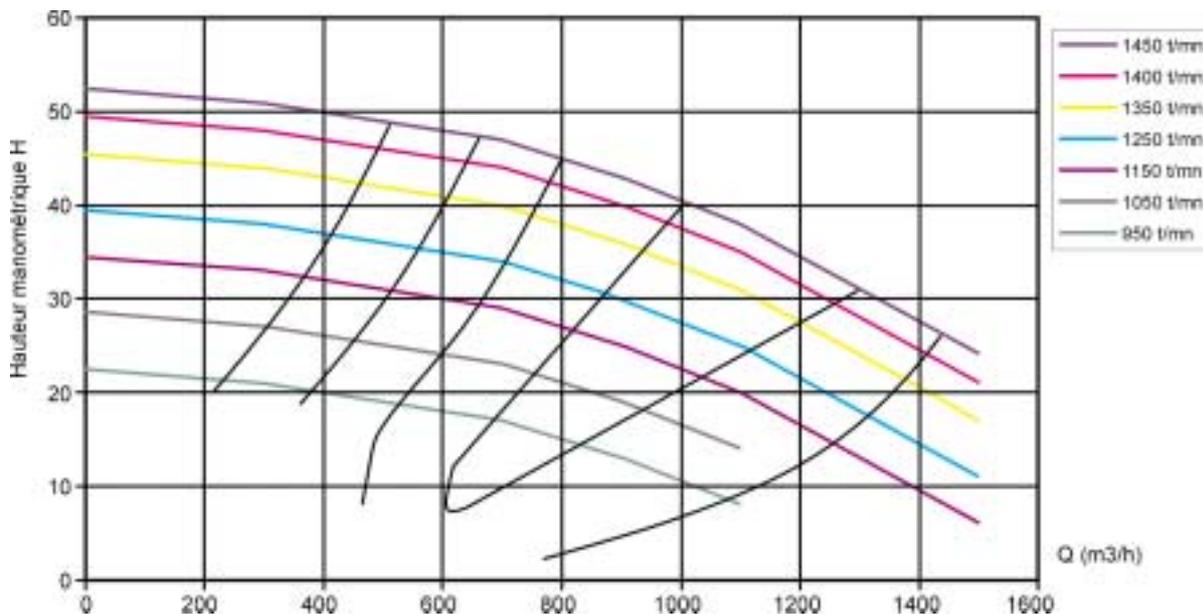


Figure 3 – Courbes caractéristiques d’une pompe à vitesse variable

LES POMPES

Il faut examiner en détail ce qui se passe lorsque la pompe est arrêtée. Il est possible qu’il subsiste un débit dans le sens habituel de traversée de la pompe voire dans le sens inverse. Il faut vérifier l’influence de la prise en compte, ou non, de l’inertie des pompes sur l’amplitude du coup de bélier. Dans le cas où cette influence serait significative, il faut obtenir la valeur de l’inertie auprès du constructeur de la pompe et du moteur. Si, pour des pompes déjà en place, une protection par volant d’inertie existe, il est nécessaire de tenir compte également de cette inertie.

Les clapets ou les robinets commandés, présents à l’aval de la pompe, doivent être connus avec précision (position, ordre de fermeture et pertes de charge occasionnées).

S’il existe une conduite permettant un écoulement en by-pass de la pompe, il faut donner les caractéristiques de cette conduite ; c’est-à-dire principalement sa longueur, son diamètre, les équipements présents sur cette conduite ainsi que les pertes de charge dues à ces équipements.

Les données relatives à une pompe sont synthétisées sous la forme d’une courbe caractéristique donnant le débit en fonction de la HMT (Hauteur manométrique totale).

Il est important de rappeler que les pompes à vitesse variable ne constituent pas une protection contre l’apparition de phénomènes transitoires. En particulier, leur utilisation est inopérante si le phénomène transitoire résulte de l’arrêt de l’alimentation électrique de la pompe. L’utilisation de la vitesse variable permet d’obtenir un point de fonctionnement stable lorsque l’on veut maintenir une pression ou un débit donné en régime permanent. La figure 3 présente un ensemble de courbes caractéristiques correspondant à différentes vitesses.

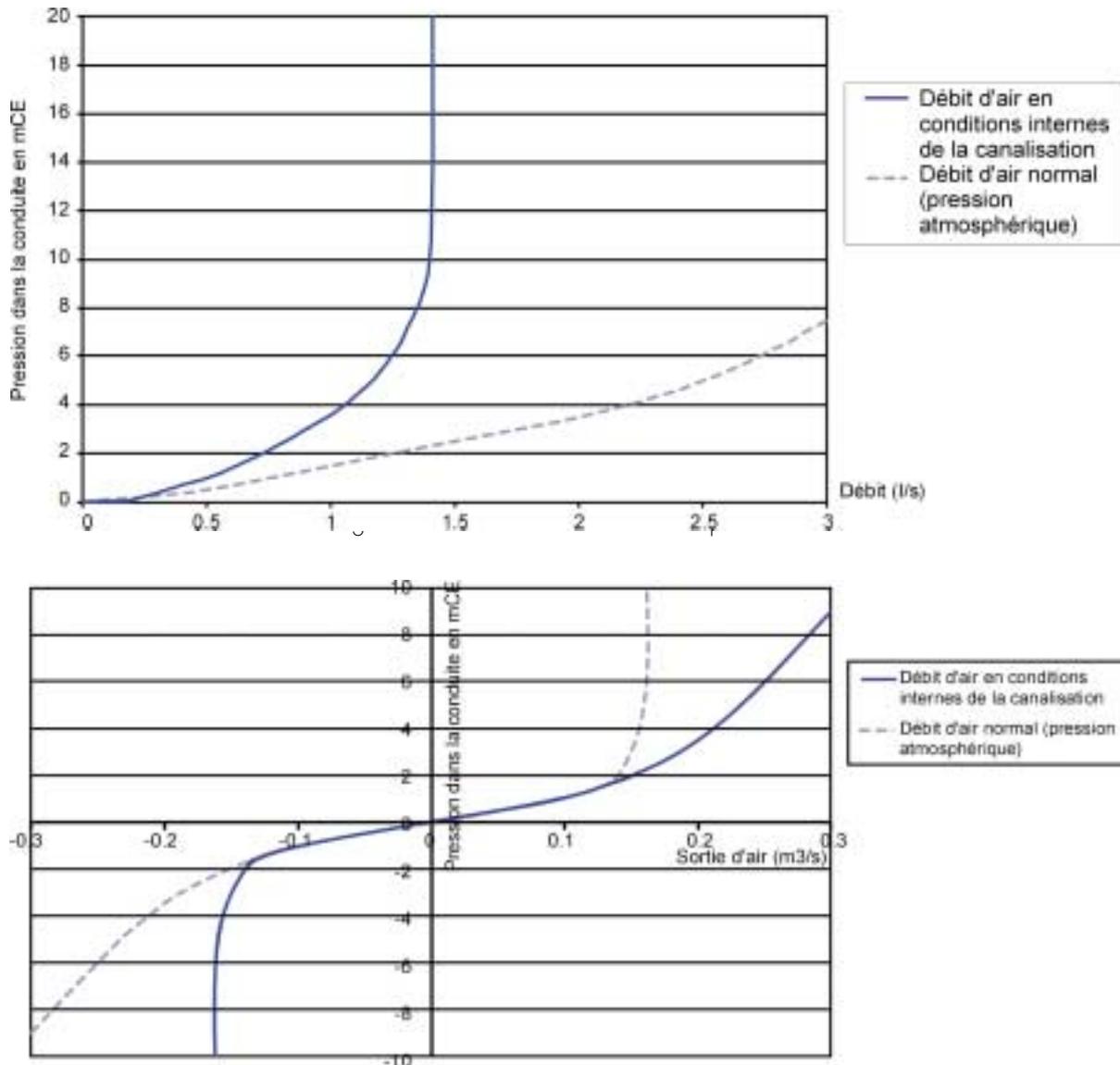


Figure 5 – Entrée et sortie d'air à grand débit

LES VENTOUSES

Elles se trouvent en général sur les points hauts. Il faut bien distinguer les ventouses permettant l'évacuation d'air de celles permettant, également, l'entrée d'air pour une lutte contre les pressions relatives négatives (cf. les deux graphiques sur les figures 4 et 5), mais qui ne peuvent fonctionner que de manière exceptionnelle pour les réseaux d'eau potable. En revanche, elles peuvent jouer un rôle plus étendu lorsque le réseau transporte de l'eau non destinée à la consommation (eaux brutes ou eau

destinée à l'irrigation) ou lors du remplissage du réseau et ce quel que soit le type d'eau.

Il faut connaître le diamètre de la ventouse ainsi que les coefficients de perte de charge à l'entrée et à la sortie. Les différentes cotes altimétriques sont également nécessaires, en particulier, la cote de l'orifice par rapport à la génératrice supérieure de la conduite.

Une ventouse n'a pas un comportement linéaire en fonction du temps et de la pression. Une étude précise devrait tenir compte notamment du retard, donc de la fiabilité et de l'efficacité

réelles de cet appareil, à sa mise en débit lors de son ouverture, mais cette donnée essentielle est difficile à obtenir.

La fermeture de la ventouse est à prendre en considération. Le retard à la fermeture est souvent bien plus important (plusieurs dixièmes de seconde) que le retard à l'ouverture. Ce retard peut occasionner des régimes transitoires. Certains constructeurs proposent des ventouses à fermeture contrôlée à la fin de la purge. Il faut tenir compte de la présence de cette fonctionnalité. Dans tous les cas, il faudra poursuivre les simulations au-delà de la fermeture des ventouses, afin de bien englober ces phénomènes de fin de purge.

Dans tout calcul, et en particulier dans les simulations informatiques, les points où sont placés les ventouses sont des points où règne une pression proche de la pression atmosphérique (soit la pression atmosphérique, soit une valeur légèrement inférieure du fait des pertes de charge dans la conduite). C'est pourquoi, il est indispensable dans le choix des nœuds de modélisation de prévoir un ou plusieurs nœud(s) intermédiaire(s) entre deux nœuds où sont modélisées des ventouses pour connaître les différentes pressions le long de la conduite.

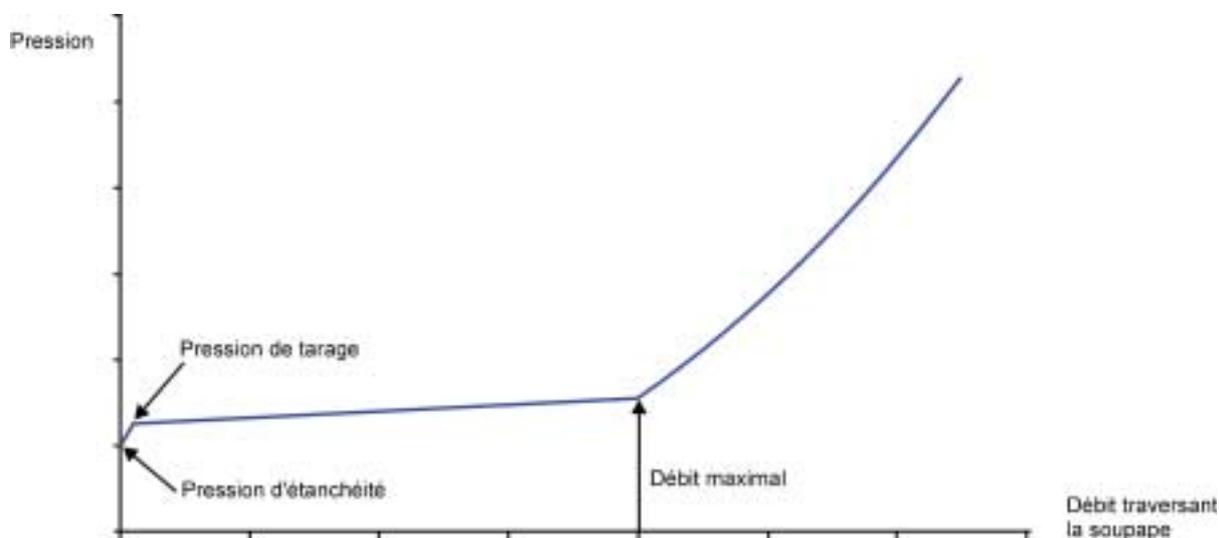


Figure 6 – Caractéristique d'une soupape

LES SOUPAPES ANTI-BÉLIER

Leur rôle est d'éliminer localement les pressions supérieures à une valeur donnée, définie par la pression de tarage.

Il faut connaître la pression de tarage ainsi que les pertes de charge dans le branchement. Il existe aussi un temps de réaction avant le début de la décharge d'une soupape sauf dans le cas de déchargeur par anticipation. Ce temps de réaction est fortement lié à la distance entre la soupape et le point de la conduite à protéger.

Pour que sa réaction soit conforme à celle annoncée par le constructeur, une soupape

doit fonctionner de façon préférentielle dans la partie linéaire du graphique de la figure 6.

LES CLAPETS

Il existe différentes technologies de clapets : à battant, à double battant, à disques concentriques, à boule, à membrane, etc. Le rôle commun à tous les clapets est d'empêcher l'écoulement du fluide dans un sens.

Dans le cadre de l'étude des régimes transitoires, il faut connaître la caractéristique dynamique d'un clapet c'est-à-dire les différents degrés de fermeture en fonction de la décroissance du débit dans la conduite.

Il faut être vigilant, lorsque plusieurs clapets sont installés en série. Cette configuration peut éventuellement entraîner des problèmes très importants de réflexions multiples des ondes et de coups de clapet.

Les clapets à boule sont à proscrire avec les appareils à compression d'air car cela entraîne un risque de coup de clapet.

LES ROBINETS DE SECTIONNEMENT

On regroupera sous ce même paragraphe les robinets-vannes et robinets à papillon ainsi que tous les organes de sectionnement comme les bornes d'irrigation, les poteaux d'incendie ou les bouches de lavage.

Il faut connaître la caractéristique de la vanne c'est-à-dire la perte de charge liée au degré d'ouverture. On peut par exemple exprimer la valeur du coefficient de perte de charge, [noté et exprimé dans la formule suivante

$$\Delta H = K \frac{V^2}{2g}$$

en fonction du degré d'ouverture du robinet. Une fois ces coefficients de perte de charge exprimés, on peut représenter des courbes du type des figures 7 et 8.

Pour pouvoir intégrer un robinet de sectionnement dans un scénario de calcul, il est nécessaire de connaître la loi de comportement dans le temps de l'actionneur pilotant le robinet. Ces informations couplées avec celles des graphiques du type de celui de la figure 7 et de la figure 8 permettent de connaître le temps à partir duquel le débit transitant dans le robinet de sectionnement peut être considéré comme nul.

Si la manœuvre du robinet de sectionnement n'est pas étudiée, il est important de connaître sa position (ouvert, fermé ou ouverture partielle).

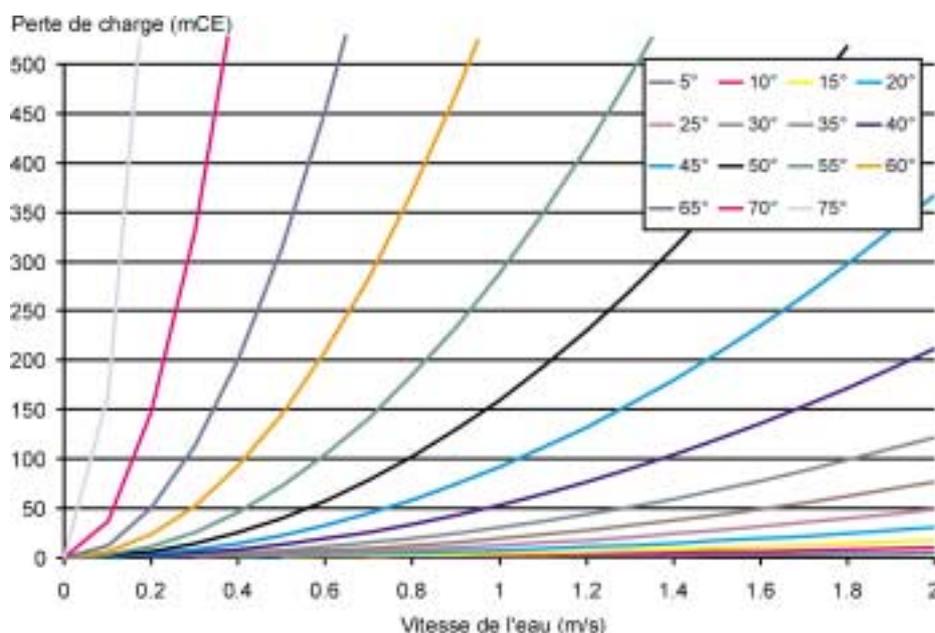


Figure 7 – Courbes de pertes de charge pour chaque degré de fermeture d'un robinet à papillon

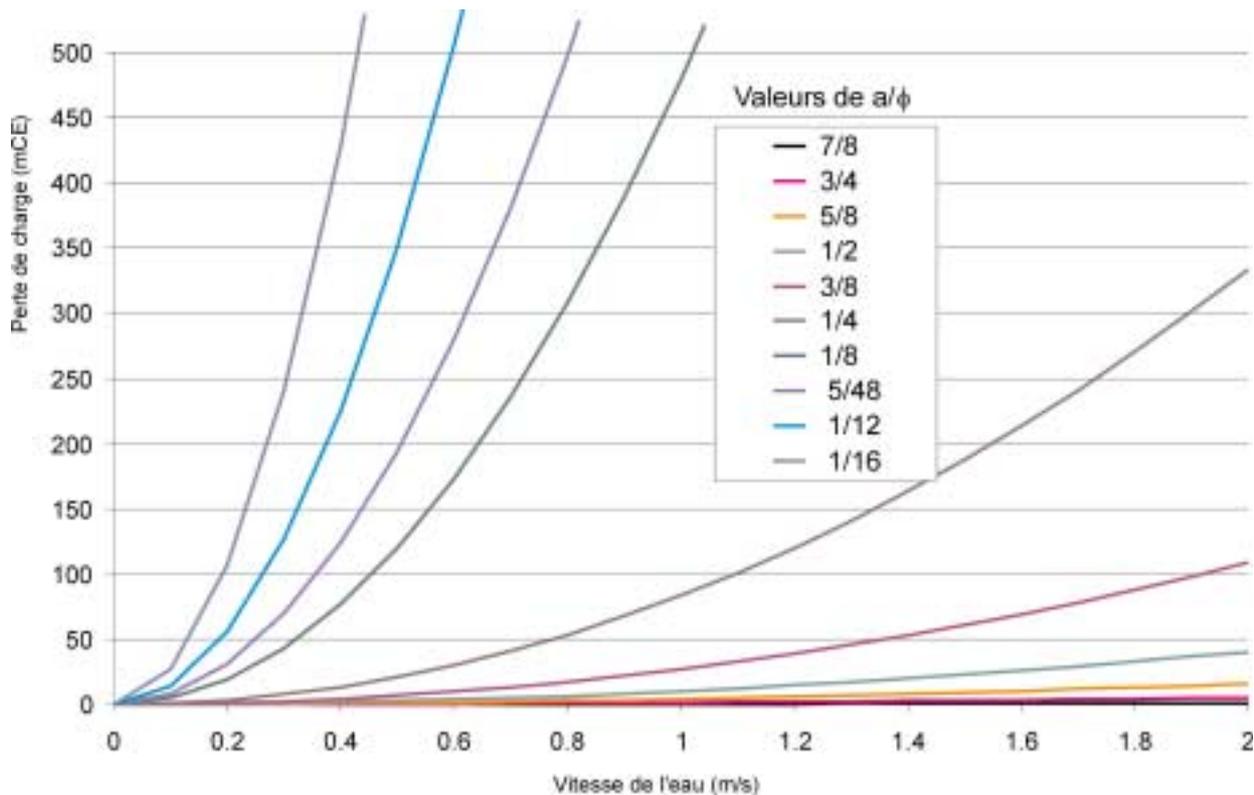


Figure 8 – Courbes de pertes de charge pour chaque degré de fermeture d'une vanne à opercule

LES BOUTS MORTS

Il s'agit d'extrémités de réseau, pour lesquelles le débit appelé à l'aval est nul. Lors de l'apparition d'un phénomène transitoire, les bouts morts engendrent une réflexion d'onde qui peut amplifier dangereusement le phénomène.

LES APPAREILS DE RÉGULATION

Nous regroupons dans la même présentation les différents stabilisateurs de pression. En régime permanent, leur rôle est le suivant :

- pour les stabilisateurs aval : maintenir la pression en dessous d'une valeur de consigne à l'aval de l'appareil ;
- pour les stabilisateurs amont : maintenir la pression au-dessus d'une valeur de consigne à l'amont de l'appareil ;
- pour les stabilisateurs amont-aval : combiner les deux fonctions précédentes en un seul appareil.

Lors d'une étude de régime transitoire, on peut distinguer deux types de stabilisateurs : ceux ayant un temps de réaction court leur permettant de changer leur degré d'ouverture, en fonction du passage des ondes de pression/dépression et ceux ayant un temps de réaction plus long qui pourront être considérés comme une perte de charge singulière, lors de l'étude du régime transitoire. Dans ce dernier cas, qui, en l'absence d'informations particulières sera celui retenu, la valeur du coefficient de perte de charge adopté sera celui engendré par le stabilisateur lors du régime permanent initial.

Pour tout autre appareil de régulation de la pression ou du débit, le même raisonnement pourra être appliqué.

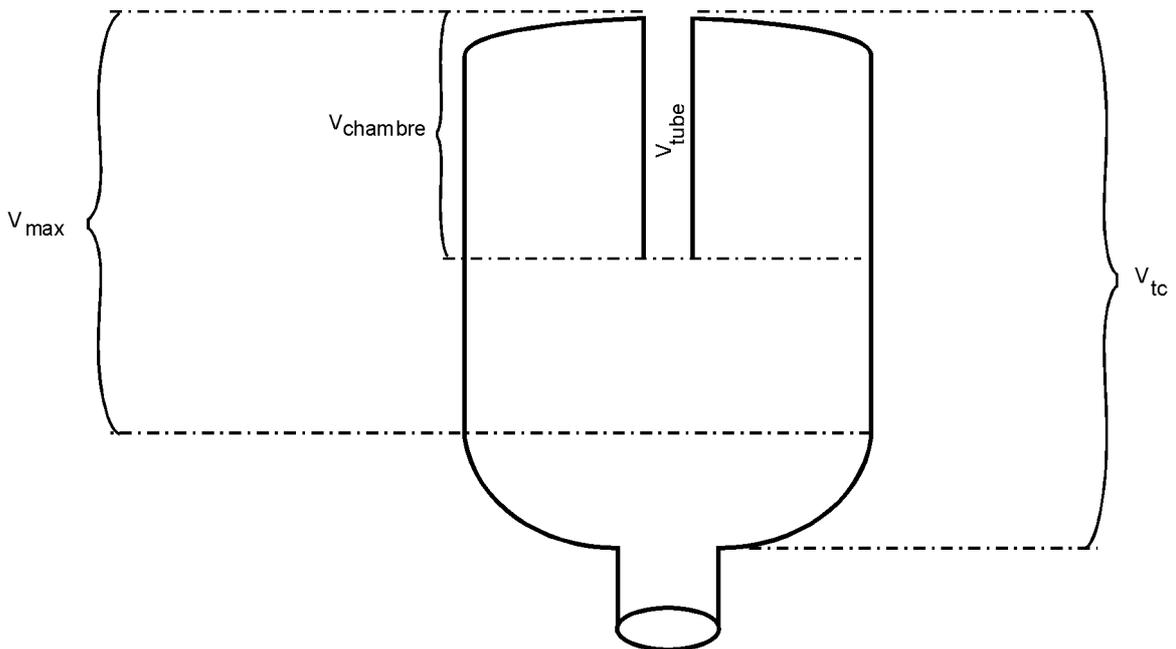


Figure 9 – Schéma simplifié d'un réservoir ARAA

LES BALLONS ANTI-BÉLIER

Il faut connaître le volume d'air et le volume total ainsi que les conditions de pré-gonflage. Il faut également savoir s'il s'agit d'un ballon avec ou sans membrane ou vessie.

Les conditions de connexion du ballon à la conduite qui définissent les coefficients de perte de charge à l'entrée et à la sortie du ballon doivent être connues (données constructeur ou organes asymétriques).

LES BALLONS DE RÉGULATION

Même s'ils peuvent, dans certains cas, avoir une action anti-bélier, ils sont à distinguer des ballons anti-bélier. En effet, ils sont dimensionnés à partir du fonctionnement en régime permanent, afin de jouer le même rôle qu'un réservoir classique.

Il faut connaître la stratégie de régulation, c'est-à-dire les pompes mises en route en fonction de la pression dans le ballon.

Il n'est pas possible d'utiliser un même ballon comme ballon de régulation et comme ballon anti-bélier. On peut, en effet, avoir besoin de la fonction anti-bélier au moment où le volume servant à la régulation est au plus bas. Par conséquent, le volume de ballon qui assurerait les deux fonctions serait très important.

LES CHEMINÉES D'ÉQUILIBRE

Il faut connaître leur géométrie mais aussi leurs conditions de connexion traduites par deux coefficients de perte de charge singuliers, l'un à l'entrée et l'autre à la sortie de la cheminée.

LES RÉSERVOIRS ANTI-BÉLIER À RÉGULATION AUTOMATIQUE (ARAA)

Une cheminée-ballon ou ARAA combine le rôle de cheminée et de ballon. Pour ce dispositif (représenté de façon simplifiée figure 9), il faut connaître la géométrie, le volume de la cham-

bre de compression, le volume du tube ainsi que la forme du fond de la cuve.

Il faut également connaître les conditions de connexion du ballon à la conduite que l'on peut exprimer sous la forme de coefficients de perte de charge ainsi que les différentes cotes avec, en particulier, la cote de l'extrémité du tube.

Les calculs

Les méthodes de calcul «à la main» telles que les épures de Bergeron peuvent être utilisées. Cependant, elles sont très lourdes, longues, fastidieuses et la démarche assez compliquée pour entraîner des risques d'erreur, d'autant qu'elles ne peuvent être envisagées raisonnablement que sur des tronçons simples.

On conseillera donc d'utiliser les logiciels existant sur le marché, tout en mettant en garde les utilisateurs de ne prendre ces logiciels que pour des outils de calcul. Ils ne doivent pas empêcher la réflexion ainsi qu'une bonne appréhension du problème. Le chargé d'études devra clairement identifier le logiciel qu'il a utilisé. La fiabilité des résultats fournis par ce logiciel devra pouvoir être vérifiée par le maître d'ouvrage (par le biais d'une liste de référence par exemple).

ÉLÉMENTS POUVANT AVOIR UNE INFLUENCE SUR LE RÉSULTAT DES CALCULS

Outre les données concernant les équipements (cf. § 1.3.2), certains points, laissés au libre choix du chargé d'études, peuvent avoir une influence sur le calcul. Ils sont répertoriés ci-dessous.

- Les nœuds à décrire

On veillera à respecter le mieux possible la topographie du terrain, et donc à connaître avec précision ces données. Dans le cas contraire, il faut absolument connaître au minimum : les points hauts, les points bas, les points correspondant à un changement de pente important,

ainsi que tous les nœuds sur lesquels se trouve un équipement.

Enfin, on s'attachera à placer au moins un nœud intermédiaire entre chaque équipement, en particulier entre deux ventouses, pour éviter le problème évoqué au § p. 12 « Les ventouses ».

- Les nœuds d'extrémité

On veillera à bien définir les extrémités, et notamment à bien distinguer les bouts morts des bornes de consommation ou des réservoirs.

- Le niveau de simplification du schéma

Comme dans toute simulation hydraulique, dans le cadre d'une étude sur un réseau complet et dans le but de simplifier le calcul, il n'est pas nécessaire de conserver tous les nœuds et tronçons. On veillera à conserver les nœuds et les tronçons importants, du point de vue du phénomène transitoire, sans oublier de reporter les données de consommation, le cas échéant.

- Le niveau de schématisation du fonctionnement des équipements

Ce niveau de schématisation est lié aux données proposées par le logiciel. Pour un ballon anti-bélier par exemple, outre son volume, il s'agira de définir le type de détente envisagée, les pertes de charge à l'entrée et à la sortie (en fonction du diamètre du piquage notamment).

MÉTHODE

Un calcul doit être réalisé pour chacun des scénarii proposés dans le cahier des charges. Ses objectifs sont doubles :

- évaluer les risques de coup de bélier sans protection,
- proposer une ou plusieurs protections anti-bélier le cas échéant.

- **Évaluation du risque de coup de bélier**

Avant d'évaluer le risque de coup de bélier, il est nécessaire :

– d'effectuer un calcul en régime permanent, afin de vérifier que l'on se trouve bien dans les conditions fixées par le cahier des charges. (bonnes cotes piézométriques, bons débits)

– de tracer la courbe enveloppe de pressions admissibles pour chacun des tronçons de conduite.

Le calcul en régime transitoire peut alors s'effectuer. Il s'effectue en deux temps : une première fois sur un temps de calcul assez court, puis, au cas où les pressions resteraient au sein de la courbe enveloppe, sur une période plus longue. En effet, certains phénomènes apparaissent après un délai et peuvent amplifier les

pressions. C'est le cas des appareils à évacuation d'air qui, en se fermant en fin de purge, peuvent créer un pic de pression dont la propagation peut être dangereuse.

• Calcul d'une protection anti-bélier

Concernant les protections anti-bélier, il est nécessaire de définir :

- leur emplacement,
- leur type et leurs dimensions.

Les protections anti-bélier existantes sont au nombre de sept.

1 LES BALLONS ANTI-BÉLIER

Conditions d'utilisation	Aucune restriction particulière. Être néanmoins vigilant à la compatibilité entre le fluide véhiculé et le revêtement intérieur
Fonction	Réserve de fluide pouvant s'écouler dans le réseau
Rôle anti-bélier	Stockage/restitution d'énergie mécanique
Calcul	Lois de la thermodynamique des gaz (être vigilant à l'utilisation des pressions absolues et relatives)
Mise en garde	Spécifier les conditions de pré-gonflage, les pertes de charge dues au branchement (en entrée et en sortie du ballon) et les informations altimétriques

2 LES CHEMINÉES D'ÉQUILIBRE

Conditions d'utilisation	<i>A priori</i> aucune restriction sauf lors du transport d'eau potable dans le réseau où il faudra veiller à la protection sanitaire. Pour limiter la taille de la cheminée, son utilisation n'est possible que dans le cas de faible hauteur de refoulement.
Fonction	Transformation d'un coup de bélier en phénomène d'oscillation en masse
Rôle anti-bélier	Stockage/restitution d'énergie mécanique
Calcul	Section assez importante pour ne pas entraîner la vidange totale lors du passage d'une sous-pression et hauteur suffisantes pour éviter le débordement au passage d'une surpression
Mise en garde	Spécifier les pertes de charge dues au branchement et le calage altimétrique

3 LES ARAA (OU CHEMINÉES BALLON)

Conditions d'utilisation	Aucune restriction, est choisi à la place d'un ballon anti-bélier lorsque la contrainte $P_{min} > P_a$ (pression minimale à l'endroit où l'on veut placer le ballon toujours supérieure à la pression atmosphérique) imposerait un volume de ballon trop important
Fonction	Réserve d'énergie potentielle et élastique
Rôle anti-bélier	Stockage/restitution d'énergie mécanique
Calcul	Lois de la thermodynamique des gaz
Mise en garde	Il faut spécifier la géométrie et les calages altimétriques

4 LES DISPOSITIFS D'ENTRÉE D'AIR

Conditions d'utilisation	Ne peut servir de protection anti-bélier pour de l'eau potable que pour des événements exceptionnels et en des points hauts
Fonction	Entrée d'air
Rôle anti-bélier	Lutter localement contre les pressions inférieures à la pression atmosphérique
Calcul	
Mise en garde	Il peut y avoir un délai de mise en admission

5 LES SOUPAPES ANTI-BÉLIER

Conditions d'utilisation	Aucune restriction
Fonction maximale	Évacuation d'un débit en fonction du dépassement d'une pression
Rôle anti-bélier	Écrêter les pressions trop fortes
Calcul	Loi de pression/débit
Mise en garde	Tenir compte des pertes de charge au branchement

6 L'ASPIRATION AUXILIAIRE

Conditions d'utilisation	Utilisable uniquement dans le cas de hauteur de refoulement faible.
Fonction	Remplissage de la conduite depuis la bache d'aspiration par une conduite en by-pass.
Rôle anti-bélier	Écrêter les dépressions à l'aval de la pompe.
Calcul	La référence de pression est soit le niveau de la bache d'aspiration soit un autre lieu (cours d'eau dans le cas d'eaux usées).
Mise en garde	Si l'on utilise une autre référence de pression que la bache d'aspiration, il faut vérifier que des problèmes de surpression n'apparaissent pas alors.

7 LES VOLANTS D'INERTIE

Conditions d'utilisation	À éviter lorsque la pompe est amenée à démarrer souvent. Incompatible avec une pompe immergée.
Fonction	Augmentation du temps d'annulation du débit.
Rôle anti-bélier	Écrêter les dépressions à l'aval de la pompe.
Calcul	Passage par une loi « débit résiduel/temps ».
Mise en garde	

20

Le choix des dimensions de la protection anti-bélier se fait par calculs successifs jusqu'à obtenir une courbe enveloppe des pressions incluse dans la courbe enveloppe des pressions admissibles. Une fois les dimensions définies, un deuxième calcul doit être réalisé sur une durée de calcul plus longue comme dans le cas des calculs de vérification de protection existante. On vérifiera alors les volumes nécessaires à la protection et son fonctionnement.

LA PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

À l'issue des calculs et après en avoir rappelé les hypothèses de définition, on fournira pour chacun des scénarii :

– les courbes enveloppes des pressions minima-

les et maximales calculées avec et sans protection anti-bélier comparées aux pressions admissibles définies dans le cahier des charges,

– les valeurs des pressions pour l'état permanent initial et pour l'état permanent final,

– la (ou les) protections anti-bélier choisie(s), sa (leur) description et les conditions de mise en œuvre. Il est important de rappeler les conditions de pré-gonflage d'un ballon anti-bélier (voir annexe).

Le chargé d'études fera la synthèse des différents scénarii étudiés et proposera au maître d'ouvrage une ou plusieurs solutions en faisant nettement ressortir les coûts et les risques couverts et ceux non couverts (probabilité d'occurrence du scénario très faible).

CAS ILLUSTRATIFS

Afin de mettre en perspective les éléments méthodologiques apportés dans la première partie, il est apparu intéressant de développer deux cas d'étude simples.

L'objectif de la présentation de ces cas n'est pas de couvrir l'ensemble des possibilités d'une étude anti-bélier. Il ne s'agit pas non plus de montrer les erreurs à ne pas commettre au cours d'une telle étude.

Le but de ce chapitre est plutôt d'amener des éléments plus concrets que ceux de la première partie.

Cas n° 1 : ouverture et fermeture d'une alimentation gravitaire



DESCRIPTION DU PROBLÈME POSÉ

Il s'agit ici d'étudier les risques d'atteindre, en régime transitoire, des pressions inférieures à la pression atmosphérique le long d'une conduite d'amenée d'eau brute depuis une cheminée d'équilibre jusqu'au droit d'une usine comportant trois chaînes de traitement de l'eau.

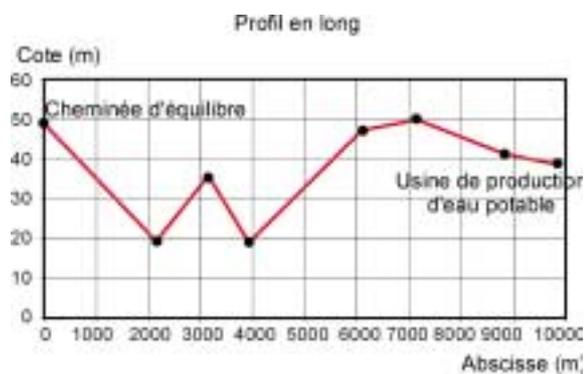


Figure 10 – Profil en long de la conduite à protéger

La canalisation prise en compte pour l'étude est celle existante de l'adduction gravitaire DN 800 / DN 700 entre la cheminée d'équilibre et l'usine de production d'eau potable. Le profil en long de cette conduite est présentée à la figure 10.

La célérité de la canalisation en fonte a été prise à 1200 m/s et deux valeurs de rugosité ont été prises (0,6 et 0,2 mm) en l'absence de mesures de terrain.

Le marnage dans la cheminée d'équilibre varie du niveau 3,18 m à 4,97 m et les cotes trop-plein et radier de cet ouvrage sont respectivement de 57,64 m et 50,7 m.

Une vanne DN 450 située sur la canalisation DN 700 près de l'usine de production d'eau potable permet de réguler le débit à 800 m³/h ou à 1200 m³/h en fonction du nombre de files de traitement en service (2 ou 3).

Trois vannes motorisées identiques DN 400 situées à l'amont de chaque file de traitement permettent l'arrêt et l'ouverture de l'adduction gravitaire d'eau brute. La durée actuelle de manœuvre de ces trois vannes est de trois minutes tant en ouverture qu'en fermeture.

SPÉCIFICATION DES RÉGIMES TRANSITOIRES ÉTUDIÉS

RÉGIME PERMANENT INITIAL

Le choix du régime permanent initial est assez immédiat puisque les deux seules variables sur lesquelles un choix peut être fait sont le niveau dans la cheminée d'équilibre et la valeur du coefficient de rugosité. Pour le coefficient de rugosité, nous avons vu que nous garderons deux possibilités. Pour ce qui concerne le niveau de l'eau dans la cheminée d'équilibre, il est évident que le plus défavorable est celui pour lequel la cote piézométrique est la plus basse c'est-à-dire 53,88 m.

SCÉNARIIS ÉTUDIÉS

Deux événements seront étudiés. Il s'agit, d'une part, de la fermeture simultanée des trois vannes d'alimentation des filières de traitement et d'autre part, de l'ouverture simultanée de ces mêmes vannes.

RÉSULTATS DES DIFFÉRENTS SCÉNARIIS

Les simulations de fonctionnement du réseau en régime transitoire ont été réalisées à l'aide du progiciel « Cebelmail ».

FERMETURE SIMULTANÉE DES TROIS VANNES

En régime permanent, le niveau piézométrique au point le plus critique (point haut pour lequel la cote de la conduite est de 50 m) est proche de la pression atmosphérique (0,7 m CE dans l'hypothèse d'une rugosité de 0,2 mm et 0 m CE

avec une rugosité de 0,6 mm). Il est donc possible, lorsque le niveau de l'eau dans la cheminée d'équilibre est bas, que la ventouse fonctionne en ce point, ce qui est tout à fait anormal en exploitation courante.

Si les mesures confirment le fonctionnement de la ventouse en régime permanent, la meilleure solution pour éviter ce fonctionnement consiste à modifier le marnage dans la cheminée d'équilibre (marnage entre 5 et 6 m). Ceci aura bien sûr pour conséquence d'augmenter légèrement la consommation énergétique ainsi que la fréquence de démarrage des pompes qui alimentent le tronçon en amont de la cheminée d'équilibre. Cette disposition est d'ailleurs nécessaire pour éviter toute dépression au point critique lors de l'ouverture simultanée des trois vannes sans être obligé d'allonger considérablement le temps de manœuvre de ces vannes comme nous allons le voir ci-après.

Dans le cas de la fermeture simultanée des trois vannes dans les conditions actuelles, une dépression importante autour du point haut est provoquée avec une valeur la plus critique d'environ - 5 m CE. Par ailleurs, l'oscillation de pression dure plus de 30 minutes à cause des faibles pertes de charge, ce qui est préjudiciable pour la remise en service de l'adduction (cf. figure 11). Par ailleurs, on remarque que la valeur de la rugosité est sans influence sur l'amplitude du phénomène. On fixera donc, par la suite, la valeur de la rugosité à 0,6 mm.

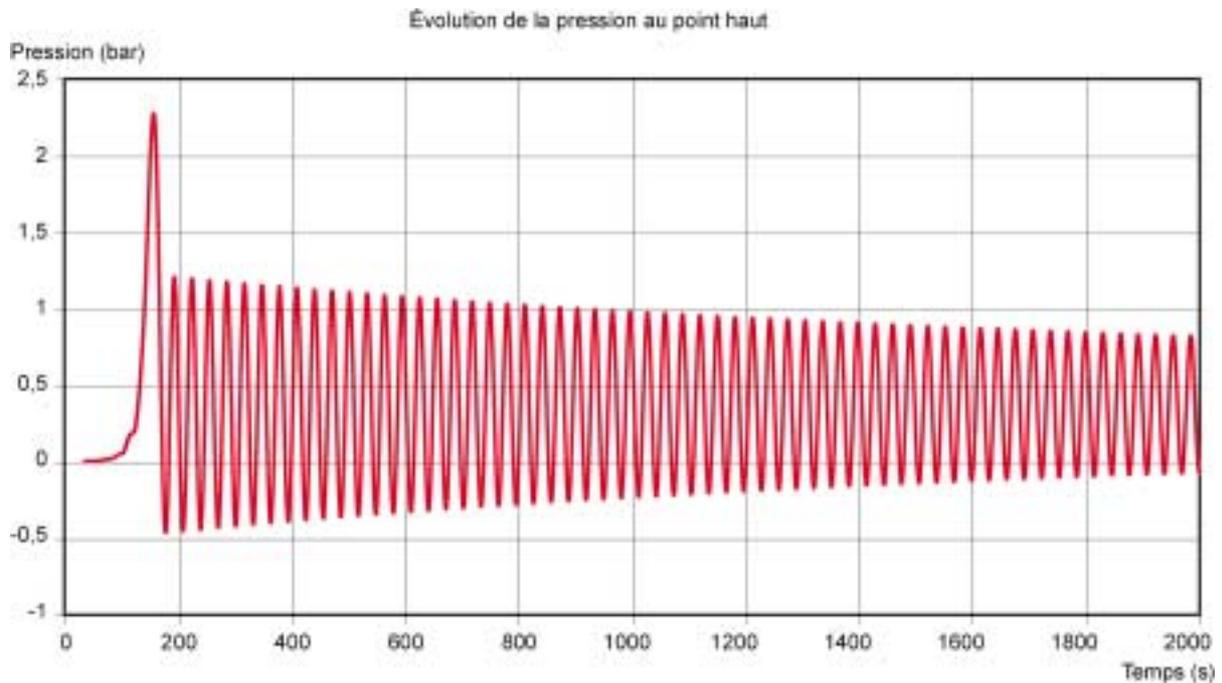


Figure 11 – Fermeture simultanée des trois vannes en situation actuelle

Bien que l'on puisse admettre une pression inférieure à la pression atmosphérique, puisqu'il s'agit d'eau brute et non d'eau potable, on préférera une solution sans pression négative et avec un phénomène oscillatoire limité en amplitude et en durée de façon à éviter respectivement la présence de poches d'air qui, outre l'augmentation des pertes de charge peuvent provoquer des coups de bélier et une usure prématurée des joints.

Pour résoudre le problème de coup de bélier provoqué par la fermeture simultanée des vannes, la solution la plus efficace est d'allonger le temps de manœuvre de ces vannes. La figure 12 montre qu'avec une durée de quatre minutes et un plan d'eau à la cote minimale de 53,9 m, il n'y a plus de problème au point critique.

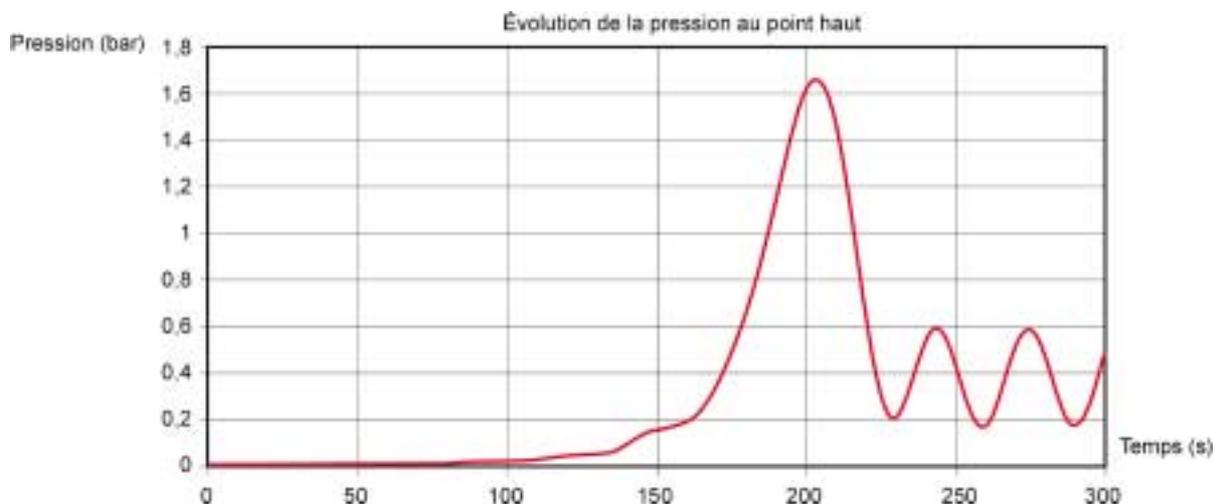
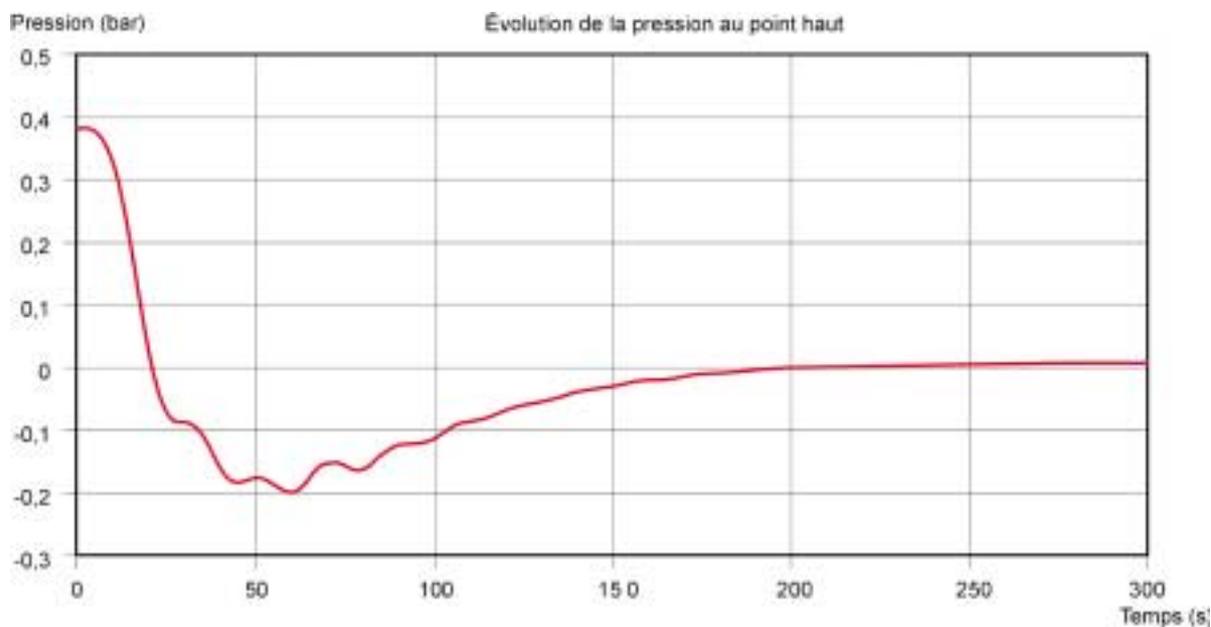


Figure 12 – Fermeture simultanée des 3 vannes en 4 minutes

OUVERTURE SIMULTANÉE DES TROIS VANNES

L'ouverture simultanée des trois vannes semble poser *a priori* moins de problème de dépression tant en ampleur qu'en durée. En effet, le

niveau piézométrique au point critique plonge d'environ deux mètres et se stabilise à la valeur de 50 m à partir de 200 secondes (cf. figure 13).

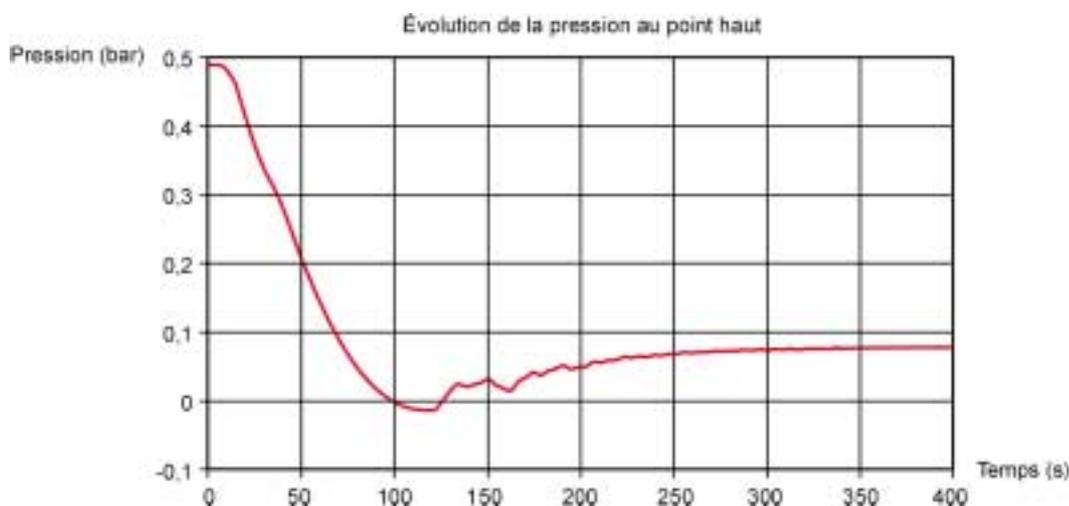


24

Mais pour éviter toute dépression en ce point, il faudrait allonger considérablement le temps de manœuvre des vannes (près de onze minutes), la cote piézométrique en régime établi étant beaucoup trop proche de la cote sol.

Avec un plan d'eau dans la cheminée d'équilibre à la cote minimale de 55 m, il faudra un

temps d'ouverture de six minutes pour éviter toute dépression au point critique (cf. figure 14). Avec une rugosité plus faible (0,2 mm), ce temps pourrait être ramené à cinq minutes, mais il faut tenir compte du vieillissement de la conduite.



CONCLUSION DES DIFFÉRENTS SCÉNARI

Le fonctionnement actuel de l'adduction gravitaire n'est pas satisfaisant tant en régime permanent, mauvais tracé initial de la canalisation avec un point haut marqué très défavorable, qu'en régime transitoire. La solution consiste, d'une part, à modifier le marnage de la cheminée d'équilibre (cote minimale de 55 m) et d'autre part, à doubler le temps de manoeuvre actuel des vannes.

Cas n° 2 : protection d'une série d'immeubles situés entre une station de pompage et un réservoir d'équilibre

DESCRIPTION DU PROBLÈME POSÉ

Il s'agit maintenant d'étudier les conditions de protection d'immeubles et en particulier du dernier étage de ceux-ci. Sur la représentation

graphique du profil en long du refoulement nous identifions une série d'immeubles pour lesquels des phénomènes d'entrée d'air ont été identifiés. Les pressions négatives apparaissant au troisième et dernier étage de ces immeubles ont été mesurées. Il a été possible de vérifier que le phénomène était lié à l'arrêt des pompes de la station de refoulement. La station de refoulement comporte trois pompes. En situation normale, une seule pompe fonctionne alors qu'en secours il est possible d'en faire fonctionner deux.

Actuellement, un ballon anti-bélier de 2 m³ est placé à l'aval de la station de pompage.

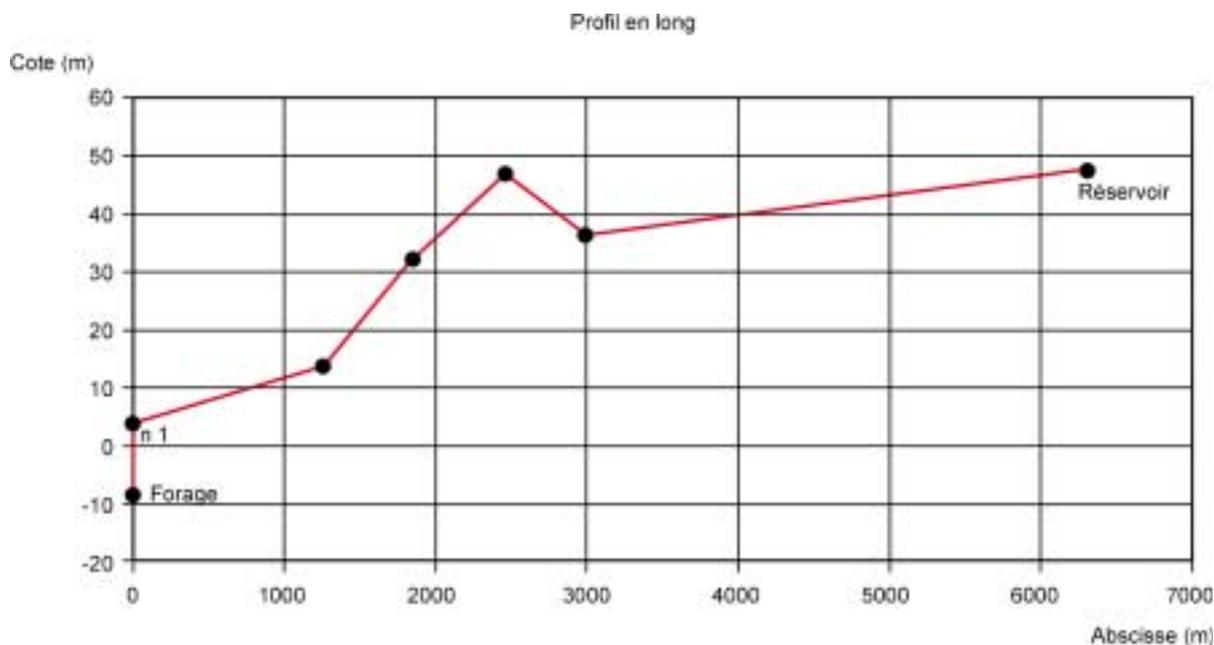


Figure 15 – Profil en long de la conduite principale

SPÉCIFICATION DES RÉGIMES TRANSITOIRES ÉTUDIÉS

RÉGIME PERMANENT INITIAL

Il n'est pas évident de choisir le régime permanent initial le plus défavorable. Nous retiendrons celui où les demandes sont les plus élevées, entraînant le plan de charge de régime permanent le plus bas auquel correspondent les phénomènes de pression les plus faibles.

SCÉNARII ÉTUDIÉS

Nous étudierons deux scénarii. Le premier consiste en l'arrêt ou la disjonction d'une seule pompe. Nous pourrions considérer qu'il s'agit là d'un événement normal et éventuellement fréquent. Le deuxième scénario consiste à étudier l'arrêt ou la disjonction des deux pompes simultanément dans le cas où ce mode d'alimentation du réseau serait utilisé, c'est-à-dire lorsque l'alimentation se fait en secours.

Dans le premier cas, nous viserons à ce que la pression au dernier étage des immeubles (considéré 9 m au-dessus de la cote sol) soit suf-

fisante. Concrètement nous souhaitons obtenir une pression de l'ordre de 4 à 5 m CE, alors que dans le deuxième cas, nous accepterons d'obtenir pendant un temps court une pression légèrement négative au dernier étage et viserons simplement une pression positive au pied de l'immeuble.

RÉSULTATS DES DIFFÉRENTS SCÉNARII

Pour ce deuxième cas illustratif, c'est également le progiciel Cebelmail qui a été utilisé pour les différentes modélisations.

ARRÊT OU DISJONCTION D'UNE SEULE POMPE

Avec le ballon anti-bélier actuel d'un volume de 2 m³, les derniers étages des immeubles connaissent une pression inférieure à la pression atmosphérique lors de l'arrêt ou de la disjonction d'une seule pompe. Nous pouvons observer ce résultat de calcul conforme à la mesure effectuée sur place par le graphique suivant de la figure 16.

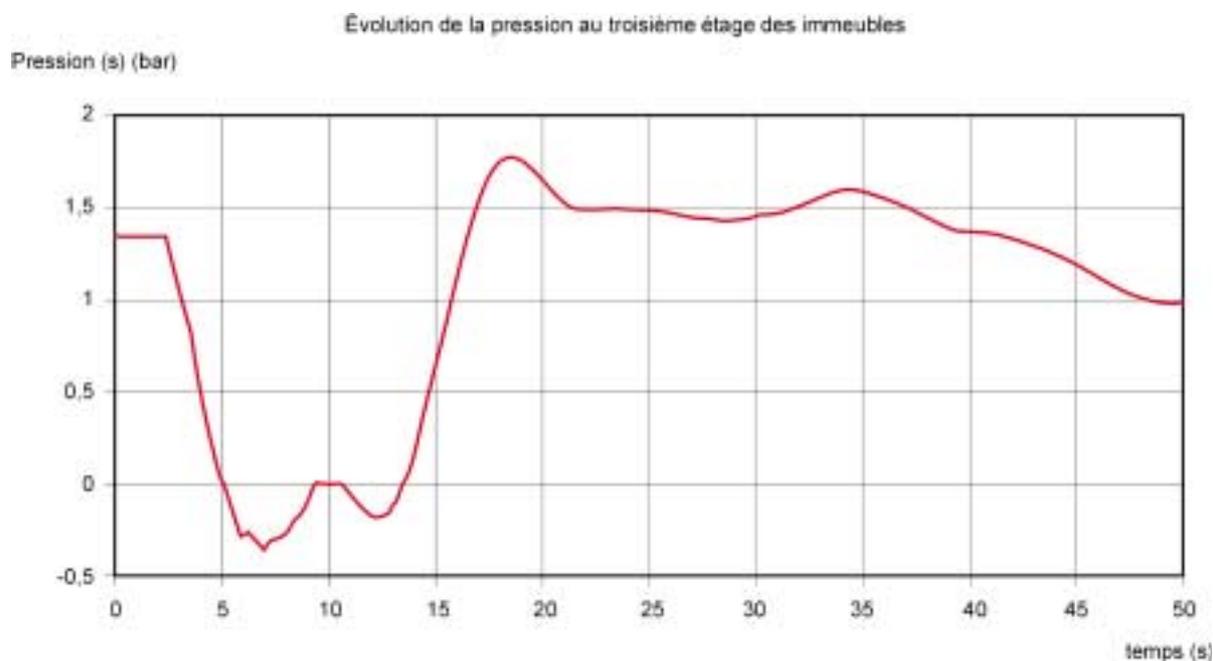


Figure 16 – Disjonction d'une pompe avec un ballon de 2 m³

On peut alors choisir de rajouter un ballon supplémentaire de 2 m³. On obtient alors une

pression minimale de 1,8 m CE au troisième étage en cas d'arrêt d'une pompe.

Évolution de la pression au troisième étage des immeubles

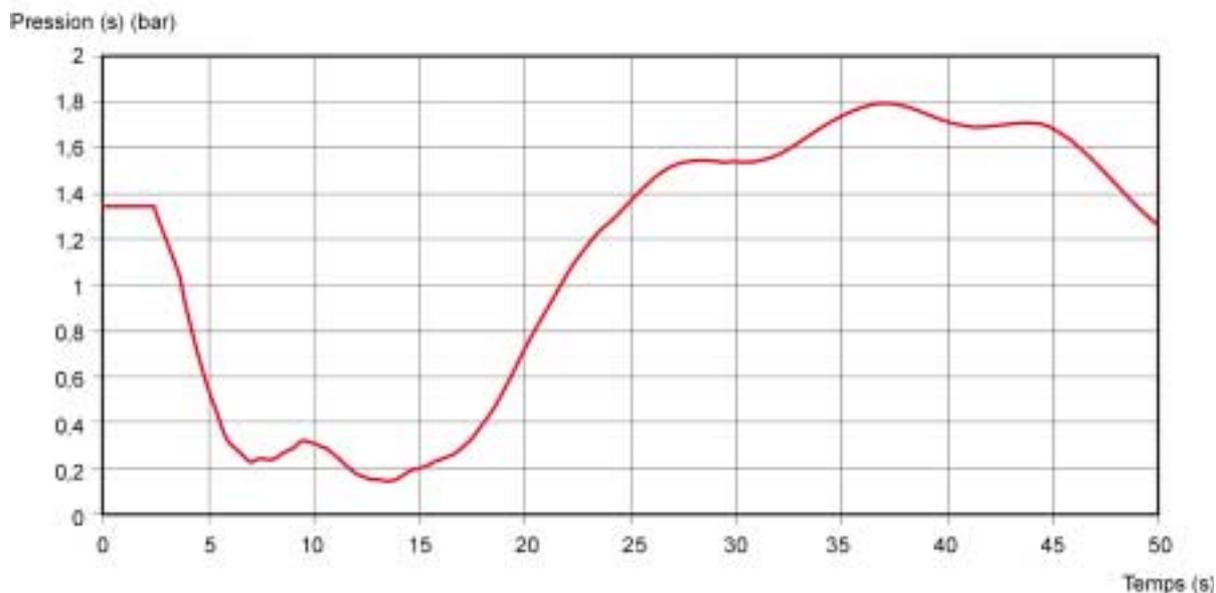


Figure 17 – Disjonction d'une pompe avec deux ballons de 2 m³ chacun

ARRÊT OU DISJONCTION DE DEUX POMPES

Si l'on repart de la configuration obtenue à l'issue du calcul précédent, c'est-à-dire deux ballons de 2 m³ chacun, on obtient alors une

pression toujours positive au sol en cas d'arrêt simultané des deux pompes comme le montre la figure 18.

Évolution de la pression au pied des immeubles

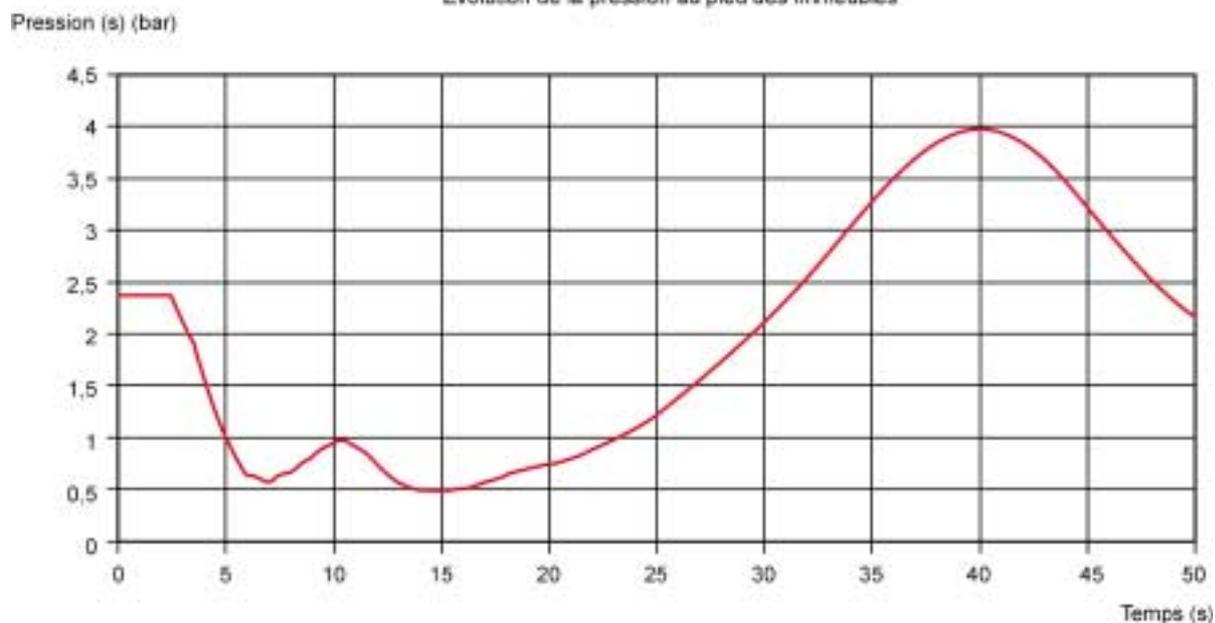


Figure 18 – Disjonction des deux pompes avec une protection de deux ballons de 2 m³ chacun

Le résultat obtenu lors de la simulation de l'arrêt ou de la disjonction des deux pompes est positif mais la pression obtenue aux derniers étages des immeubles est insuffisante lors de l'arrêt d'une seule pompe. Nous pouvons alors

tester la réaction de ce système si nous adjoignons un ballon de 4 m³ au ballon de 2 m³ existant actuellement. Les résultats présentés Figure 19 montrent que les objectifs fixés sont atteints grâce aux deux ballons anti-bélier.

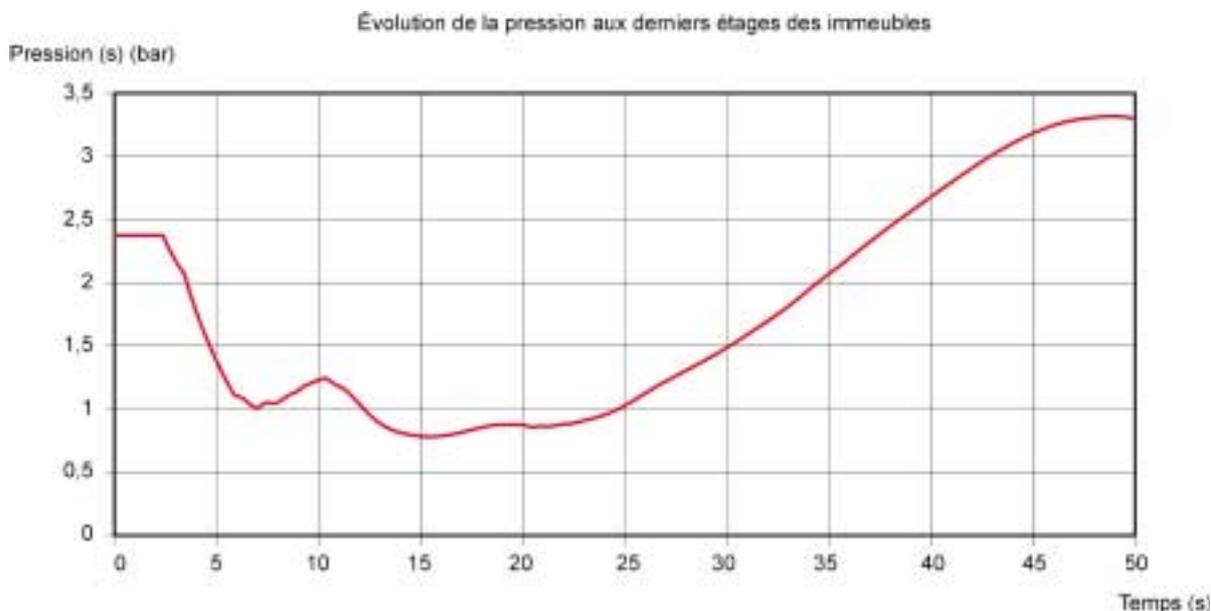


Figure 19 – Disjonction des deux pompes avec un ballon de 4 m³ en plus du ballon de 2 m³

CONCLUSION DES DIFFÉRENTS SCÉNARI

L'étude des différents scénarii permet de retenir l'ajout d'un deuxième ballon anti-bélier en plus du ballon de 2 m³ existant. Ce nouveau ballon sera d'un volume de 4 m³ pré-gonflé à 6 bars. Grâce à ces deux ballons la pression

de service sera convenable à un peu plus de 0,4 bar au dernier étage des immeubles en fonctionnement normal du réseau. Avec cette capacité totale de ballon, la pression minimale au sol en cas de disjonction de deux pompes à la station serait d'environ 0,7 bar.

ANNEXE

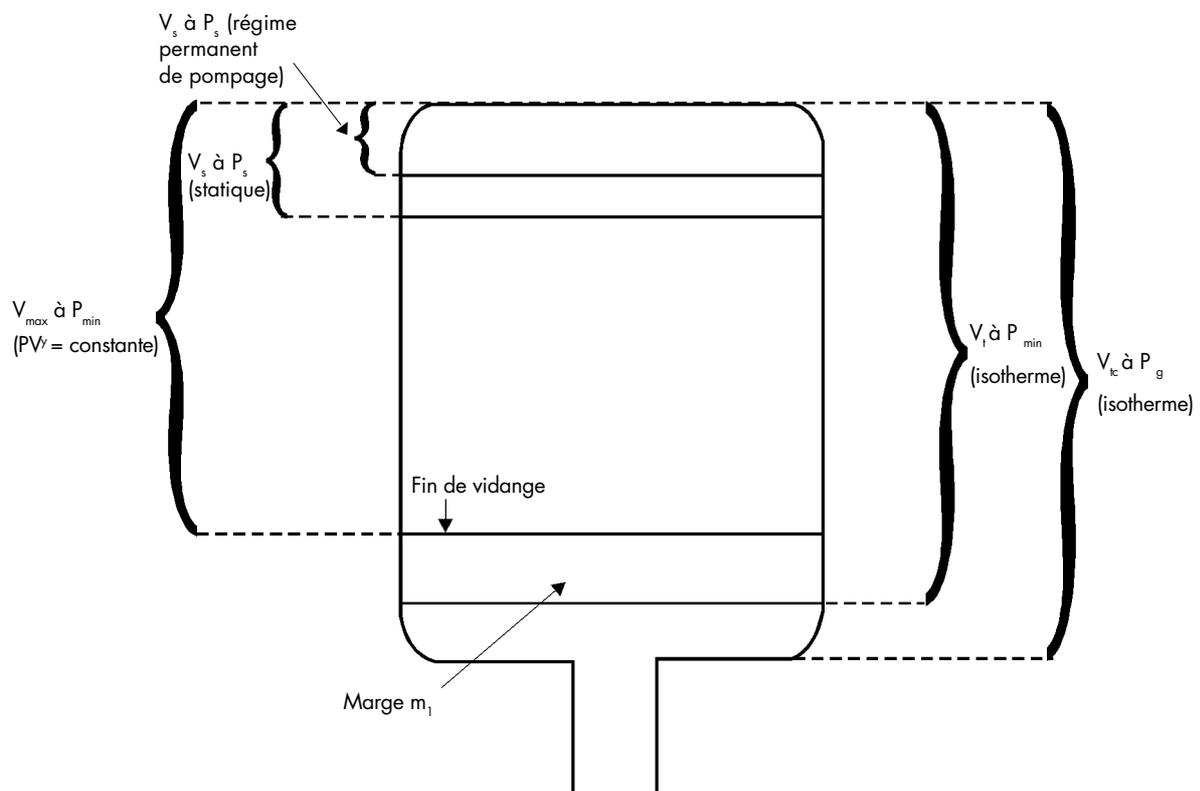
Détermination du volume d'un ballon anti-bélier

Cette annexe reprend les points essentiels de la note d'information n° 15 du Conseil général du génie rural des eaux et des forêts rédigée par M-E. Roche et intitulée « Dimensionnement final des ballons anti-bélier ».

Notations

L'ensemble des notations utilisées est défini sur la figure suivante.

29



Méthode à retenir

Le calcul en régime transitoire a été utilisé en utilisant la loi $P.V^\gamma$ dans laquelle γ varie de 1 (isotherme-vidanges lentes) à 1,4 (adiabatique – vidanges rapides). La valeur intermédiaire $\gamma = 1,2$ est généralement retenue. Ce calcul aboutit à déterminer la pression P_{\min} et le volume d'air V_{\max} en fin de vidange.

Pour la suite du calcul, il faut adopter la loi $P.V = \text{constant}$ (isotherme – loi de Mariotte) car le ballon gonflé, ainsi qu'à l'état statique ou en régime permanent de pompage, est à l'équilibre thermique. On peut donc écrire :

$$V_t = \frac{P_o V_o}{P_{\min}}$$

Remarque : $V_t > V_{\max}$ pour $\gamma > 1$ et l'écart peut être important. C'est donc V_t et non V_{\max} qui permet de dimensionner le ballon.

Prenons V_{tc} (volume total commercial) $> V_t$

D'où P_g (pression de gonflage du ballon vide d'eau) : $P_g = \frac{V_{tc}}{V_{\max}}$

Les marges de sécurité s'expriment alors par les formules suivantes :

- ✓ en isotherme : $m_1 = \frac{V_{tc}}{V_t}$
- ✓ à la vidange (régime transitoire) : $m_2 = \frac{V_{tc}}{V_{\max}}$

30

Meilleure utilisation du ballon

Si la marge m_1 est suffisante, il est possible d'adopter une pression définitive $P'_g > P_g$, ce qui permet de mieux utiliser le ballon V_{tc} choisi (enveloppe de dépression plus haute).

$$\text{D'où } V'_o = V_{tc} \frac{P'_g}{P_o} \quad \text{et } V'_t = \frac{P_o V'_o}{P'_{\min}}$$

Dans le cas où l'on obtient $V_{tc} > V'_t$ on peut redéfinir de nouvelles marges de sécurité :

- ✓ $m'_1 = \frac{V_{tc}}{V'_t}$
- ✓ $m'_2 = \frac{V_{tc}}{V'_{\max}}$



La réalisation d'études de protection des réseaux d'eau contre les phénomènes de coup de bélier s'avère souvent délicate. Pour que de telles études se passent bien il est nécessaire que les hypothèses et les scénarios à étudier soient clairement précisés par le maître d'ouvrage.

Ce guide présente les différents éléments à détailler pour réaliser une étude anti-bélier. Il propose également deux cas concrets d'études illustrant les étapes à mettre en œuvre.



The management of water hammer protection studies in water networks is often difficult. To facilitate such studies, the assumptions and the scenarios studied should be clearly specified by the network owner. To carry out a water hammer protection study, the different elements to be detailed are presented in this document. Two practical cases illustrating the stages to be done are also put forward.

Les documents techniques du FNDAE

N°	Désignation de l'ouvrage	Parution
1	L'exploitation des lagunages naturels	1985
2	Définition et caractéristiques techniques de fonctionnement et domaine d'emploi pour les appareils de désinfection	1986
3	Manuel pratique pour le renforcement et l'étanchéité des réservoirs d'eau potable	1986
4	Plan de secours pour l'alimentation en eau potable	1986
5	Les stations d'épuration adaptées aux petites collectivités	1986
5 bis	Les stations d'épuration – Dispositions constructives pour améliorer leur fonctionnement et faciliter leur exploitation	1992
6	Les bassins d'orages sur les réseaux d'assainissement	1988
7	Le génie civil des bassins de lagunage naturel	1990
8	Guide technique sur le foisonnement des boues activées	1990
9	Les systèmes de traitement des boues des petites collectivités	1990
10	Élimination de l'azote dans les stations d'épuration biologiques des petites collectivités	1990
11	L'eau potable en zone rurale – Adaptation et modernisation des filières de traitement. Réédition 1998	1992
12	Application de l'énergie photovoltaïque à l'alimentation en eau potable des zones rurales	1996
13	Lutte contre les odeurs des stations d'épuration	1993
14	Les procédés à membrane pour le traitement de l'eau et de l'assainissement	1996
15	Financement du renouvellement des réseaux d'adduction d'eau potable	1993
16	La gestion collective de l'assainissement autonome – Bilan des premières expériences	1993
17	Les nouvelles techniques de transport d'effluents	1996
18	La décantation lamellaire des boues activées	1994
19	Guide sur la gestion de la protection des captages d'eau potable dans les vallées alluviales	1997
20	Connaissance et maîtrise des aspects sanitaires de l'épandage des boues d'épuration des collectivités locales	1998
21	Études préalables au zonage d'assainissement. Guide méthodologique à l'usage des techniciens	1998
22	Filières d'épuration adaptées aux petites collectivités	1998
23	Application des énergies renouvelables à la potabilisation et à l'épuration des eaux	1999
24	Performances des systèmes de traitement biologique des graisses	2001
25	Traitement de l'azote dans les stations d'épuration des petites collectivités	2002
26	Insufflation d'air fines bulles. Application aux stations d'épuration en boues activées des petites collectivités	2002
27	Guide méthodologique d'études anti-bélier pour les réseaux d'eau potable	2002
Documents hors-série		
HS 4	Élimination des nitrates des eaux potables	1993
HS 5	Les différents procédés de stockage des boues d'épuration avant valorisation en agriculture	1993
HS 9	Les pollutions accidentelles des eaux continentales	1995
HS 10	Le renouvellement des réseaux d'eau potable	1994
HS 11	L'utilisation des eaux usées épurées en irrigation	1998
HS 12	La dégradation de la qualité de l'eau potable dans les réseaux	1998
HS 13	Le contrôle et l'entretien des installations d'assainissement non collectif. État de la réglementation et bilan des services publics de gestion des installations.	2000
INV90NA	Situation de l'alimentation en eau potable et de l'assainissement dans les communes rurales en 1990. Synthèse nationale 1990	1993
INV90DE	Synthèse nationale et résultats départementaux 1990	1993
INV95NA	Situation de l'alimentation en eau potable et de l'assainissement dans les communes rurales en 1995. Synthèse nationale 1995	1997
INV95DE	Synthèse nationale et résultats départementaux 1995	1997

NB : certains numéros sont épuisés. Tous les documents techniques FNDAE sont disponibles sous forme numérique sur le site <http://www.eau.fndae.fr>. Pour obtenir des tirages papier, les commandes sont à adresser au Cemagref, DSIC/IST, BP 44, 92163 Antony Cedex. Tél. 01 40 96 62 85, Fax 01 40 96 61 64.