



Arc Ingénierie

Etudes - Conseils - Formation

---

## MODELISATION ET SIMULATION DU REGIME TRANSITOIRE DANS LE CADRE DU PROJET AEP ABIDJAN SUD (EN PHASE II) : CAS D'APPLICATION DU LOGICIEL CEBELMAIL

---

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU  
MASTER EN INGENIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT  
OPTION : INFRASTRUCTURES ET RESEAUX HYDRAULIQUES

---

Présenté et soutenu publiquement le [date] par :

**Befaga CISSE**

---

Jury d'évaluation du stage :

Président : Prénom NOM

Membres et correcteurs : Prénom NOM  
Prénom NOM  
Prénom NOM

---

**Travaux dirigés par :**

**Dr. Moustapha Almami TOURE**, Directeur Général de  
Arc Ingénierie

**M. Adama DIABAGATE**, Ingénieur chargé d'études  
Hydrauliques et Hydrogéologiques

**M. Roland YONABA**, Assistant d'Enseignement et de  
Recherche LEAH/2IE

**Promotion [2015/2016]**

---

## DEDICACE

---

*Je dédie ce mémoire :*

*Principalement à mon très cher oncle Monsieur  
Adama CISSE, grâce à qui ce document voit ce  
grand jour, de m'avoir donné la chance de continuer  
mes études supérieures grâce à son soutien financier,  
moral et matériel.*

*Particulièrement à mon père Feu CISSE Siriki et ma  
mère chérie CISSE Mafatouma pour son soutien  
moral et surtout ses précieuses prières et  
bénédictions.*

*À tous mes frères et sœurs.*

---

## REMERCIEMENTS

---

Je remercie Docteur **Moustapha Almami TOURE**, Directeur Général de Arc Ingénierie de m'avoir donné la chance d'intégrer l'équipe de Arc Ingénierie, pour ses précieux conseils et sa disponibilité pendant ce stage.

Je remercie également Monsieur **Adama DIABAGATE**, mon maître de stage et Monsieur **Aboubacar SISSOKO** qui m'ont énormément apporté beaucoup de connaissances pendant ce stage. Merci pour toutes aides que vous avez pu m'apporter lors du stage et pour votre totale disponibilité.

Merci à toute l'équipe de Arc Ingénierie pour les sympathies et les disponibilités à chaque fois que j'ai eu recours à vous.

Je remercie particulièrement mon encadreur pédagogique, **Monsieur Roland YONABA**, pour le suivi de mon mémoire, pour ses conseils et surtout sa disponibilité à chaque instant que j'ai recours à lui pendant ma formation d'ingénieur.

Je remercie enfin tout le corps professoral de 2iE et mes collègues au cours de ces trois années de formation.

---

## RESUME

---

La présente étude porte sur la modélisation et la simulation du régime transitoire d'une ligne de transfert d'eau potable dans le cadre de la phase II du projet d'Alimentation en Eau Potable (AEP) de la ville d'Abidjan Sud par la nappe du Sud Comoé. Cette ligne de transfert est composée de deux réservoirs au sol de capacité 5000 m<sup>3</sup> chacun, reliés par une conduite de 46 km en fonte ductile DN 900 et un poste surpresseur équipé d'une pompe de 4000 m<sup>3</sup>/h. Les aspects abordés ont été la caractérisation des effets de coup de bélier et ainsi que la détermination des caractéristiques d'organes de protection du réseau. Pour l'étude, il a été défini différents scénarii à forte probabilité d'occurrence et susceptibles de générer un coup de bélier lors du fonctionnement de la ligne de transfert d'eau potable : scénarii de manutention de vanne en fonctionnement gravitaire, scénarii de disjonction et démarrage en pompage. La modélisation et la simulation des différents scénarii ont été réalisées sous le logiciel CEBELMAIL Salto.

Les résultats de la simulation ont permis de caractériser les grandeurs caractéristiques de l'installation (débits, vitesses, pressions, charges) lors de l'apparition d'un coup de bélier. Aussi il a été proposé l'installation de 3 ballons anti-béliers de volume 5, 10 et 100 m<sup>3</sup> ; de 3 soupapes de décharges de pression de déclenchement allant de 12 à 16 bars ; de 7 ventouses dissymétriques pour assurer la protection du réseau de transfert suivant tous les scénarii définis.

### Mots-clés :

---

- 1. Abidjan**
- 2. CEBELMAIL**
- 3. Coup de bélier**
- 4. Modélisation et simulation hydraulique**
- 5. Régime transitoire**

---

## ABSTRACT

---

This study focuses on modeling network hydraulics and simulating unsteady flow. The design work is carried on a drinking water transfer line as part of phase II of the project of Drinking Water Supply Network of the city of Abidjan by the South tablecloth South Comoé. This transfer line is composed of two standpipes, of capacity 5,000 m<sup>3</sup> each, connected by a DN 900 ductile iron pipe of 46 km and a booster pump station producing a discharge of 4,000 m<sup>3</sup>/h. The discussed issues were the characterization of water hammer effects and the determination of the characteristics of network protection devices. For the study, it was defined different scenarios with high probability of occurrence and likely to generate a pressure surge during operation of the support network: valve handling scenarios in gravity operation, disjunction scenarios and start pumping. Modeling and simulation of various scenarios have been simulated under the CEBELMAIL Salto software. The simulation results were used to draw out the characteristic quantities of the installation (flows, speeds, pressures, heads at every network node and every pipe) upon the occurrence of a water hammer. As a result, it has been proposed to install 3 water hammer balloons of capacity ranging from 5, 10 to 100 m<sup>3</sup>; 3 trigger pressure relief valves from 12 to 16 bars; 7 asymmetrical suction cups to protect the network following all defined scenarios.

### Keywords :

---

- 1. Abidjan**
- 2. CEBELMAIL**
- 3. Waterhammer**
- 4. Modeling and hydraulic simulation**
- 5. Unsteady flow**

---

## LISTE DES ABREVIATIONS

---

2iE	Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
AEP	Alimentation en Eau Potable
APD	Avant-projet Détaillé
APS	Avant-projet Sommaire
BM	Bonoua – Moossou
MP	Moossou – Port Bouet
PEHD	Polyéthylène Haute Densité
INS	Institut National de la Statistique
SODECI	Société de Distribution d'Eau de la Côte d'Ivoire

---

**LISTE DES SYMBOLES ET NOTATIONS**


---

<b>Symbole ou notation</b>	<b>Unité</b>	<b>Définition</b>
<b>a</b>	m/s	Célérité des ondes de propagation
<b>D</b>	m	Diamètre des conduites
<b>e</b>	m	Epaisseur de la paroi de la conduite
<b>E</b>	N/m <sup>2</sup>	Module d'élasticité du matériau
<b>K</b>	N/m <sup>2</sup>	Module de compressibilité du liquide
<b>L</b>	m	Longueur de la conduite
<b>g</b>	m/s <sup>2</sup>	Accélération de la pesanteur
<b>H</b>	m	Charge hydraulique
<b>N</b>	tr/mn	Vitesse de rotation nominale de la pompe
<b>Ns</b>	tr/mn	Vitesse spécifique de la pompe
<b>PFA</b>	m	Pression de fonctionnement admissible
<b>PN</b>	m	Pression nominale
<b>Q</b>	m <sup>3</sup> /s	Débit
<b>V</b>	m/s	Vitesse dans les conduites
<b>S</b>	m <sup>2</sup>	Section de la conduite
$\lambda$		Coefficient de friction
$\rho$	Kg/m <sup>3</sup>	Masse volumique du fluide
$\Delta h$	m	Variation de la pression
<b>Tf</b>	s	Temps de fermeture

---

---

## SOMMAIRE

---

<b>DEDICACE.....</b>	<b>II</b>
<b>REMERCIEMENTS.....</b>	<b>III</b>
<b>RESUME.....</b>	<b>IV</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>V</b>
<b>LISTE DES ABREVIATIONS.....</b>	<b>VI</b>
<b>LISTE DES SYMBOLES ET NOTATIONS .....</b>	<b>VII</b>
<b>SOMMAIRE .....</b>	<b>VIII</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX .....</b>	<b>IX</b>
<b>LISTE DES GRAPHIQUES.....</b>	<b>X</b>
<b>LISTE DES FIGURES.....</b>	<b>XI</b>
<b>I. INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
<b>II. REVUE DE LITTERATURE.....</b>	<b>3</b>
II.1. GENERALITES SUR LE REGIME TRANSITOIRE .....	3
II.2. CEBELMAIL, MODELE NUMERIQUE POUR LA RESOLUTION DU COUP DE BELIER .....	8
<b>III. MATERIEL ET METHODES .....</b>	<b>11</b>
III.1. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE.....	11
III.2. APPROCHE METHODOLOGIQUE .....	14
<b>IV. RESULTATS .....</b>	<b>21</b>
IV.1. SYNTHESE DE L'ETUDE DES GRANDEURS CARACTERISANT LE REGIME PERMANENT .....	21
IV.2. SYNTHESE DE L'ETUDE DU REGIME TRANSITOIRE .....	22
<b>V. CONCLUSION .....</b>	<b>32</b>
<b>VI. RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES.....</b>	<b>33</b>
<b>VII. BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>34</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>I</b>

---

## LISTE DES TABLEAUX

---

TABLEAU 1 : GRANDEUR ET VALEURS EXTREMES DE LA CELERITE DANS LES CONDUITES.....	4
TABLEAU 2 : EQUIPEMENT DE PROTECTION ANTI-BELIER.....	8
TABLEAU 3 : EVOLUTION DE LA POPULATION DE LA ZONE 1 A L'HORIZON 2029 (SOURCE INS).....	13
TABLEAU 4 : DIAMETRES, VITESSES ET PERTES DE CHARGES SUR LA LIGNE DE TRANSFERT.....	21
TABLEAU 5 : CALCUL DE LA POMPE DE SURPRESSEUR DE MOOSSOU.....	21
TABLEAU 6 : LES CARACTERISTIQUES DU BALLON ANTI-BELIER.....	26
TABLEAU 7 : LES CARACTERISTIQUES DES BALLONS ANTI-BELIER SUR LE BIEF BONOUA - MOOSSOU	27
TABLEAU 8 : CARACTERISTIQUES DES SOUPAPES.....	27
TABLEAU 9 : SYNTHESSES DES ORGANES SPECIAUX DE PROTECTION DU RESEAU.....	28

---

## LISTE DES GRAPHIQUES

---

GRAPHIQUE 1 : PROFIL EN LONG DU RESEAU RECONSTITUE .....	16
GRAPHIQUE 2 : LOIS DES MANŒUVRES DES POMPES.....	19
GRAPHIQUE 3 : LOIS DE MANŒUVRES DE FERMETURE DES VANNES .....	19
GRAPHIQUE 4 : EVOLUTION DES COURBES ENVELOPPES DE PRESSION A L'ARRET DE LA POMPE .....	23
GRAPHIQUE 5 : EVOLUTION DES PRESSIONS AUX NEUDS A L'ARRET DE LA POMPE .....	23
GRAPHIQUE 6 : ENVELOPPES DE DEPRESSIONS ET DE SURPRESSIONS AU DEMARRAGE DE LA POMPE ...	24
GRAPHIQUE 7 : EVOLUTION DES PRESSIONS AUX NEUDS AU DEMARRAGE DE LA POMPE.....	24
GRAPHIQUE 8 : ENVELOPPES DES SURPRESSIONS ET DEPRESSIONS A LA FERMETURE DE LA VANNE ....	25
GRAPHIQUE 9 : PROTECTION PAR BALLON ANTI-BELIER DE 100 M <sup>3</sup> ET VENTOUSE DISSYMETRIQUE.....	29
GRAPHIQUE 10 : EVOLUTION DES VOLUMES DANS LE BALLON PENDANT L'ARRET DE LA POMPE.....	29
GRAPHIQUE 11 : PROTECTION PAR DEUX BALLONS DE 10 M <sup>3</sup> ET DE 5 M <sup>3</sup> PLUS VENTOUSE DISSYMETRIQUE .....	30
GRAPHIQUE 12 : EVOLUTION DES VOLUMES DANS LES BALLONS AU DEMARRAGE DE LA POMPE.....	30
GRAPHIQUE 13 : PROTECTION PAR TROIS SOUPAPES ANTI-BELIER.....	31
GRAPHIQUE 14 : EVOLUTION DES PRESSIONS DANS LES SOUPAPES A LA FERMETURE DE LA VANNE ....	31

---

## LISTE DES FIGURES

---

FIGURE 1 : REPARTITION DU COUP DE BELIER DANS LE CAS D'UNE PERTURBATION RAPIDE .....	7
FIGURE 2: REPARTITION DU COUP DE BELIER DANS LE CAS D'UNE PERTURBATION LENTE.....	7
FIGURE 3 : CARTE DE SITUATION D'ABIDJAN EN COTE D'IVOIRE.....	11
FIGURE 4 : CARTE DE ZONAGE DE LA VILLE D'ABIDJAN SELON LA SODECI.....	12
FIGURE 5 : CARTE DE LA ZONE D'ETUDE (ZONE 1) AVEC SES 7 COMMUNES .....	12
FIGURE 6 : SCHEMA DE CONFIGURATION DE LA LIGNE DE TRANSFERT (ARC INGENIERIE, 2015) .....	14

---

## **I. INTRODUCTION**

---

L'alimentation en eau potable des agglomérations urbaines et rurales est l'une des priorités de l'Etat de Côte d'Ivoire depuis son accession à l'indépendance en 1960. Pour assurer ce service public, plusieurs mesures ont été prises, entre autre la politique de concession du service public d'eau potable au secteur privé en 1959 et les programmes spéciaux d'investissement tels que le Programme National de l'Hydraulique de 1973. La demande en eau potable de la population d'Abidjan est assurée par l'exploitation des eaux souterraines de la nappe d'Abidjan, dont la capacité s'avère insuffisante, outre la menace d'une contamination par des sources de pollution organique et chimique (Arc Ingénierie, 2015).

Ainsi, le gouvernement de Côte d'Ivoire, à travers le ministère des infrastructures économiques, a entrepris d'engager un ensemble d'actions pour pallier le déficit d'eau. Il s'agit de la réalisation d'une ligne de transfert d'eau potable prise à la nappe Sud Comoé, à environ 50 km d'Abidjan. La 1<sup>er</sup> phase du projet, proposée sur la base d'une étude APS menée par Arc Ingénierie, a été mise en service depuis le lundi 02 mars 2015 et a permis un apport de 80 000 m<sup>3</sup>/j d'eau issue de 18 forages dont 7 sur champs captant de ONO et des 11 sur les champs captant de TCHINTCHEBE. La 2<sup>nd</sup>e phase vise à accroître la production de 80 000 m<sup>3</sup>/j supplémentaires pris sur 7 forages du champ captant de ONO et 11 forages du champ captant d'Abrobakro (Arc Ingénierie, 2015). Pour cette dernière phase l'étude de conception mener sur la base du régime permanent est déjà effective, cependant le comportement et la réponse du réseau en régime transitoire n'a pas encore été effectuée.

Les phénomènes transitoires, appelés aussi « coup de bélier » surviennent dans les réseaux sous pressions par la modification du régime permanent, suite à un incident électrique provoquant l'arrêt brutale d'une ou plusieurs pompes, au démarrage d'une pompe et par des manœuvres de fermeture ou d'ouverture des vannes. Cette modification du régime permanent de l'écoulement engendre des perturbations énormes qui s'avèrent dangereuses et causent d'énormes dégâts sur les équipements hydrauliques (Bergeron, 1950). Ceci intervient lorsque les surpressions et les dépressions générées pendant ses perturbations dépassent les limites des pressions maximales et minimales admissible du réseau en régime permanent. Cependant lors des installations des réseaux en charge, il est impératif d'étudier soigneusement ces phénomènes transitoires car l'amplitude des surpressions et des dépressions mises en jeu ont des conséquences néfastes sur le réseau (Guhl, 2002).

---

La présente étude se fixe pour objectif général de **modéliser et de simuler en régime transitoire le comportement de la ligne de transfert d'eau potable d'Abidjan Sud par la nappe Sud Comoé** afin de renforcer sa conception. À cette fin, les objectifs spécifiques d'étude qui ont été déclinés sont les suivants :

- produire un modèle de réseau permettant de retrouver les grandeurs caractéristiques de l'écoulement au régime permanent ;
- définir les scénarii probables de manutention du réseau pouvant occasionner l'apparition du régime transitoire ;
- simuler le réseau pour les différents scénarii afin d'identifier les solutions de renforcement du réseau.

Le présent document est organisé comme suit : nous présenterons d'abord la théorie hydraulique et les notions liées au régime transitoire en réseau en charge en guise de revue de la littérature ; puis nous présenterons la méthodologie mise en œuvre dans le cadre de cette étude. Ensuite nous présenterons les résultats obtenus sur lesquels nous mènerons une discussion. Puis, après conclusion, nous formulerons quelques recommandations issues des limites de la présente étude.

## II. REVUE DE LITTERATURE

### II.1. Généralités sur le régime transitoire

#### II.1.1. Définition

On appelle régime transitoire toute modification de l'écoulement permanent. Lorsqu'il se produit, les grandeurs physiques (débit, vitesse, pression, charge) caractérisant l'écoulement en tout point du réseau varient en fonction du temps. Cette modification de l'écoulement initial engendre des variations brusques de la pression dans le réseau donnant naissance au phénomène du **coup de bélier** (Bergeron, 1950).

Le coup de bélier est un phénomène de propagation d'ondes élastiques de surpression et de dépression, il peut prendre naissance aussi bien dans les conduites gravitaires que dans les conduites de refoulement. La brutalité du coup de bélier est à l'origine de nombreuses ruptures de conduites car les surpressions engendrées peuvent atteindre des amplitudes très élevées. Les dépressions engendrées aussi peuvent créer des poches de cavitations dangereuses pour les canalisations et pour appareils de robinetteries. Lors de la conception d'un réseau, les risques éventuels de coup de bélier doivent être étudiés, afin de mettre en œuvre les protections qui s'imposent (Guhl, 2002).

#### II.1.2. Les équations du phénomène de coup de bélier

Les équations qui définissent les phénomènes de coup de bélier sont obtenues en appliquant l'équation de continuité et l'équation de la conservation des quantités de mouvements en faisant intervenir la compressibilité du liquide (Mar, 2009).

- **L'équation de continuité**

L'équation de la conservation de masse ou de continuité s'exprime selon la relation suivante :

$$\frac{\partial(\rho S)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho S V)}{\partial x} = 0 \quad (1.)$$

- **L'équation de la conservation de la quantité de mouvement**

L'équation de quantité de mouvement découle de l'équation fondamentale de la dynamique qui s'exprime par :

$$\frac{m d\vec{V}}{dt} = \sum \vec{F}_{\text{extérieures}} \quad (2.)$$

En utilisant la notion de dérivée particulaire sur l'accélération  $\frac{d\vec{V}}{dt}$  et en admettant que les seules forces extérieures sont les forces de volume (poids) et de pression, on obtient l'équation de quantité de mouvement comme suit (Mar, 2009) :

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} = -g \frac{dz}{dx} - \frac{1}{\sigma} \frac{dP}{dx} \quad (3.)$$

- **La vitesse de propagation des ondes (célérité)**

La vitesse de propagation des ondes appelée aussi sous le nom célérités des ondes, est proportionnelle à la rigidité du matériau et à la nature du fluide transité par la conduite (Cote, 1998). Pour une conduite transportant un fluide donné, la valeur de la célérité de l'onde s'obtient en appliquant l'équation suivante (Mercier, 2001):

$$a = \frac{1}{\sqrt{\rho \left( \frac{1}{K} + \frac{D}{e.E} \right)}} \quad (4.)$$

**Tableau 1 : Grandeur et valeurs extrêmes de la célérité dans les conduites**

Matériau	Célérité (m/s)	Valeurs extrêmes
<i>Polyéthylène haute densité</i>	300	230 - 430
<i>Polyéthylène base densité</i>	150	115 - 180
<i>PVC</i>	400	300 - 500
<i>Amiante-ciment</i>	1000	900 - 1200
<i>Acier</i>	1100	1000 - 1250
<i>Fonte grise</i>	1150	900 - 1300
<i>Fonte ductile</i>	1200	1000 - 1350

### II.1.3. Les équations d'Allievi

Les équations d'Allievi s'obtiennent en admettant des hypothèses simplificatrices sur l'équation de continuité et des quantités de mouvement.

- l'énergie cinétique dans la charge hydraulique est négligée ;
- la compressibilité du fluide est prise en compte ;

- la déformation élastique de la conduite est prise en compte ;
- les variations de la masse volumique et de section sont négligeables devant les variations du débit et de la charge ;
- la vitesse est uniforme dans la section.

La prise en compte de ces hypothèses simplificatrices sur les équations (1) et (3) permet d'obtenir le couple d'équations suivant (Mar, 2009) :

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gS} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (5.)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gS \frac{\partial H}{\partial x} = 0 \quad (6.)$$

En dérivant les équations (5) et (6) par rapport aux variables position (x) et temps (t), on obtient par combinaison linéaire la forme finalisée des équations d'Allievi (Mar, 2009):

$$\frac{\partial^2 Q}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} \quad (7.)$$

$$\frac{\partial^2 H}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} \quad (8.)$$

La nature hyperbolique de ces équations nécessite donc des méthodes de résolutions bien particulières (Biaou, 2009).

#### II.1.4. Méthode de résolution des équations du coup de bélier

Pour la résolution des équations de coup de bélier, plusieurs méthodes techniques ont été développées par différents auteurs. Les approches techniques identifiées comprennent la méthode analytique d'Allievi, la méthode des caractéristiques, la méthode graphique de Bergeron (Mar, 2009).

- **La méthode graphique de Louis Bergeron**

La méthode graphique de Louis Bergeron établie en 1933, permet de déterminer dans les systèmes hydrauliques en charge la variation de la pression et du débit dues aux coups de bélier sans expliciter analytiquement la nature de l'onde. Elle a pour principe de représenter l'évolution du débit en fonction de la pression observée par un observateur. Celui-ci se déplace selon le sens de l'onde de pression à la vitesse de célérité des ondes. Le principe de la méthode part de la charge hydraulique et de la vitesse d'écoulement fourni par la relation suivante en faisant des hypothèses simplificatrices (Bergeron, 1950):

$$H = F_1(at - x) + F_2(at + x) \quad (9.)$$

$$V = \frac{g}{a} [F_1(at - x) - F_2(at + x)] \quad (10.)$$

La fonction  $F_1$  correspond à l'onde progressive et  $F_2$  correspond l'onde régressive c'est-à-dire l'onde qui se déplace dans le sens inverse de l'écoulement, ces deux fonctions sont interchangeable. Sachant que  $V = Q/S$  l'équation (9) devient :

$$\frac{aQ}{gS} = F_1(at - x) + F_2(at + x)$$

En sommant et en soustrayant (9) et (10), on obtient :

$$H + \frac{aQ}{gS} = 2F_1(at - x) \quad (11.)$$

$$H - \frac{aQ}{gS} = 2F_2(at + x) \quad (12.)$$

$F_1$  et  $F_2$  étant interchangeable, on a alors :

$$H + \frac{aQ}{gS} = cste \quad (13.)$$

$$H - \frac{aQ}{gS} = cste \quad (14.)$$

L'équation (13) décrit l'observateur se propageant dans le sens de l'écoulement et l'équation (14) décrit l'observateur se propageant dans le sens inverse de l'écoulement. Avec ces deux constantes, on détermine la charge  $H$  et le débit  $Q$  à chaque instant  $t$  pour la construction des épures de Bergeron (Mounirou, 2014).

- **La méthode des caractéristiques**

Lorsque le réseau devient très complexe, la méthode de Louis Bergeron se voit être fastidieuse en application dans la résolution des équations d'Allievi. Dans ce cas de figure, une méthode mieux adaptée est celle des caractéristiques. Elle est la plus utilisée pour la résolution des équations d'Allievi. Ladite méthode est transposée aujourd'hui sur les logiciels commerciaux, qui sont très performants dans la résolution des régimes transitoire en vue de l'optimisation des protections anti-bélier dans les stations de pompage et sur l'ensemble du réseau (Lencastre, 1996).

### II.1.5. Effet du coup de bélier

Les effets du coup de bélier sont fonction de la nature de la perturbation occasionnée sur le réseau. Pour une perturbation rapide c'est-à-dire instantanée ( $t_{AR} > T_f$ ) la variation maximale de pression ne dépend pas de la longueur de la conduite et est déterminée par la formule classique d'Allievi (Mar, 2009) :

$$\Delta h = \pm \frac{a \cdot v_0}{g} \quad (15.)$$

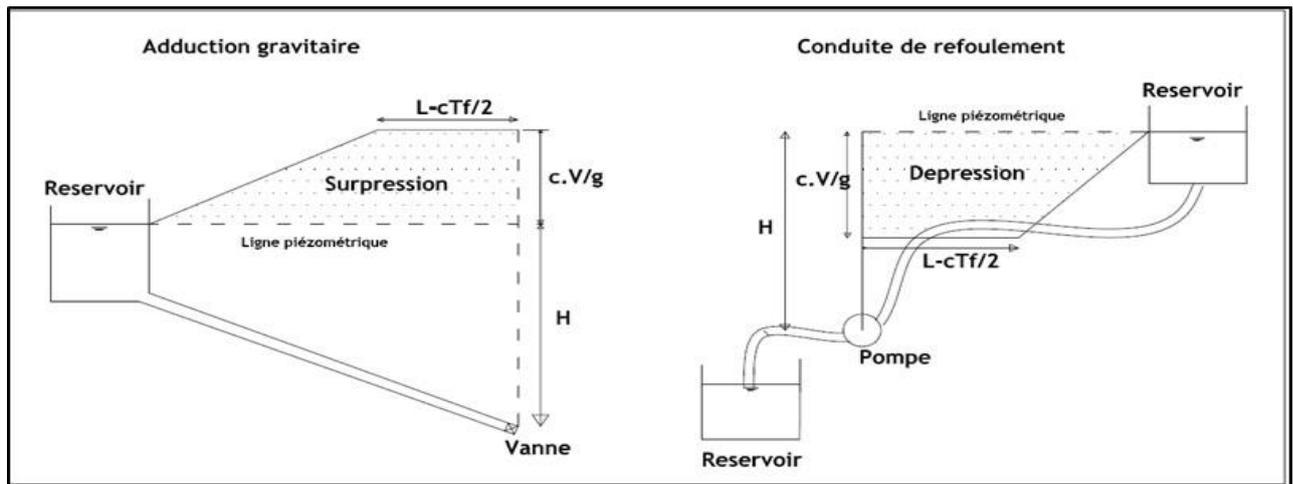


Figure 1 : Répartition du coup de bélier dans le cas d'une perturbation rapide

Pour une perturbation lente ( $t_{AR} < T_f$ ), la variation maximale de pression ne dépend pas de la célérité des ondes, c'est-à-dire la pression à tout moment et en tout point de la conduite se trouve de la même manière. On la détermine par la formule de Michaud (Mar, 2009):

$$\Delta h = \pm \frac{2 \cdot L \cdot v_0}{g \cdot \tau} \quad (16.)$$

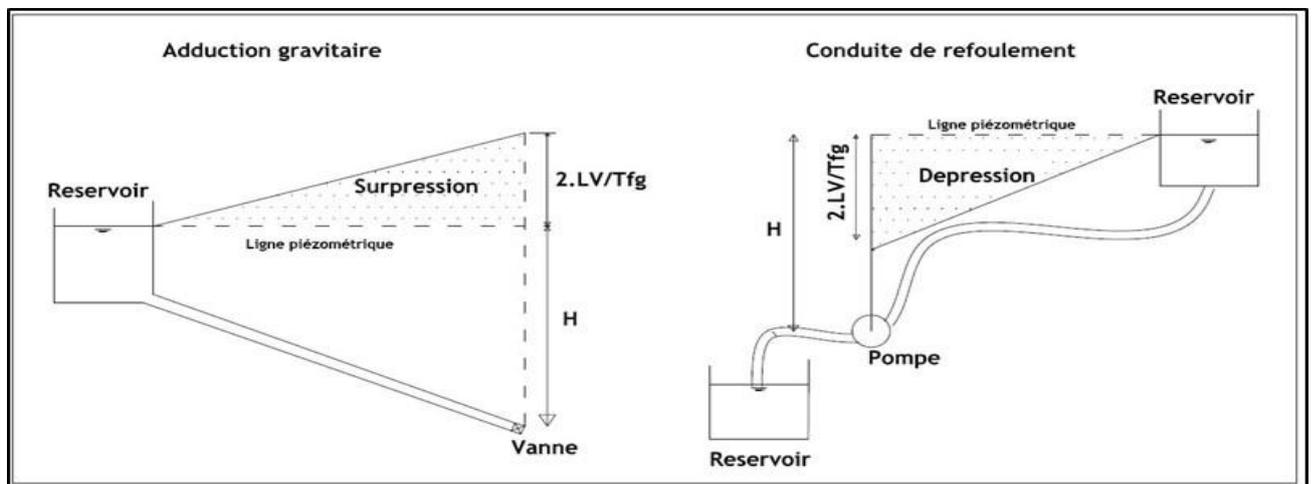


Figure 2: Répartition du coup de bélier dans le cas d'une perturbation lente

Cette formule de Michaud permet d'avoir une première idée de l'importance que peuvent prendre les amplitudes de variations des pressions dues aux coups de bélier. Elle donne la limite de cette variation de pression (augmentation ou diminution de pression) dans une conduite.

### II.1.6. Les équipements de protection anti-bélier

Il existe plusieurs types d'organes de protections à mettre en œuvre pour limiter un coup de bélier à une valeur admissible (Meunier, 1980). Elles agissent soit en ralentissant la modification de la vitesse du fluide, soit en limitant la surpression par rapport à la dépression (Lencastre, 1996).

**Tableau 2 : Equipement de protection anti-bélier**

Equipements	Fonction	Rôle anti-bélier
<i>Ballon anti-bélier</i>	Réserve de fluide pouvant s'écouler dans le réseau.(Spécifier les conditions de pré-gonflage)	stockage et restitution d'énergie mécanique
<i>Cheminé d'équilibre</i>	transformation d'un coup de bélier en phénomènes d'oscillation en masse	stockage et restitution d'énergie mécanique
<i>Ventouse</i>	Entrée et sortie d'air	lutter localement contre les dépressions
<i>L'aspiration auxiliaire</i>	Remplissage de la conduite depuis la bache d'aspiration par une conduite en by-pass	Ecrêter les dépressions à l'aval de la pompe
<i>Soupape anti-bélier</i>	Evacuation d'un débit en fonction du dépassement d'une pression maximale	Ecrêter les pressions trop fortes
<i>Les volants d'inertie</i>	Augmentation du temps d'annulation du débit	Ecrêter les dépressions à l'aval de la pompe

## II.2. CEBELMAIL, modèle numérique pour la résolution du coup de bélier

Plusieurs modèles numériques ont été développés pour l'étude des régimes transitoire. Entre autres, nous retrouvons le Bélier, KSB (KSB), AFT Impulse (AFT CATALONIA Engineering Solutions, 1996), HAMMER (Bentley). CEBELMAIL (Diadème Ingénierie, 1993) se distingue de ces modèles existants par son approche de résolution et son interface simplifiée. C'est l'outil qui a été retenu dans la présente étude.

CEBELMAIL permet le calcul des coups de bélier dans des réseaux en charge, ramifiés ou maillés. Il peut être utilisé à différentes fins, dont l'objet principal est l'étude des coups de bélier et des équipements anti-bélier, dans les réseaux sous pression (Arc Ingénierie, 2015). CEBELMAIL est donc utile en phase de projet comme en phase de diagnostic ou d'analyse d'un réseau existant. Il aide à tester un équipement anti-bélier et même à le choisir. Accessoirement aussi, il permet le calcul de la distribution des débits dans le réseau, en régime permanent.

De façon globale, un réseau est décrit par un ensemble de nœuds et de tronçons qui les relie. Un nœud peut modéliser plusieurs éléments du réseau tels qu'un nœud simple, un réservoir, un point de consommation, une soupape, une ventouse, une singularité, etc. les tronçons correspondent à plusieurs composants du réseau, comme par exemple une conduite simple, une pompe, une vanne, un clapet, un stabilisateur de pression amont et aval, etc.

#### ○ *Représentation de la perte de charge*

La conduite est représentée par une canalisation circulaire en charge dans laquelle la perte de charge est décrite par la formulation de Darcy et Weisbach (1775) (Lencastre, 1996).

$$J = \frac{8. \lambda. Q^2. L}{g. \pi. ^2 D^5} \quad (17.)$$

Cette équation fait intervenir le paramètre de friction  $\lambda$  défini par la formule de Colebrook et White (1839)

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left( \frac{K}{3.7. D} + \frac{2.51}{Re. \sqrt{\lambda}} \right) \quad (18.)$$

CEBELMAIL discrétise la perte de charge linéaire en pertes de charges singulières sur les longueurs élémentaires égales au produit de la célérité et du pas de temps de simulation choisi (Arc Ingénierie, 2015).

#### ○ *Représentation des pompes (centrifuges)*

Une pompe centrifuge représente une pompe sur laquelle une manœuvre peut être effectuée. CEBELMAIL intègre 4 manœuvres type à simuler : pompe en marche, pompe arrêtée, pompe au démarrage et disjonction de pompe. Dans CEBELMAIL, les pompes centrifuges sont modélisées, pour n'importe quel nombre caractéristique  $N_s$  par un ensemble de polynômes du deuxième ordre.

La vitesse spécifique  $N_s$  est calculée par :

$$N_s = N \frac{Q^{1/2}}{H^{3/4}} \quad (19.)$$

○ *Représentation des vannes*

Une vanne est destinée à représenter les vannes à fermeture ou ouverture lente. Une commande de manœuvre est programmée par une loi de manœuvre. CEBELMAIL étudie les ondes générées par cette manœuvre. Un paramètre de position caractéristique de la vanne (nombre de tour, angle...) est associé à une perte de charge. Cette perte de charge est modélisée par une équation de type Borda.

$$\Delta H_v = K \frac{V^2}{2g} \quad (20.)$$

### III. MATERIEL ET METHODES

#### III.1. Présentation de la zone d'étude

##### III.1.1. Situation géographique

L'agglomération d'Abidjan est située au sud de la Côte d'Ivoire, dans le Golfe de Guinée et est comprise entre la latitude 5°00' et 5°30' N et les longitudes 3°50' N et 4°10' W. Elle s'étend sur une superficie de 57 735 ha.

La ville d'Abidjan compte 10 communes, auxquelles viennent s'ajouter les communes d'Anyama, de Bingerville et de Songon pour former ce qui est appelé l'agglomération d'Abidjan.

Elle est subdivisée en quatre zones selon le découpage de la SODECI.

- Zone 1 : comporte 7 communes (Port-Bouët, Koumassi, Marcory, Treichville, Plateau, Adjamé et Attecoubé) ;
- Zone 2 : constituée essentiellement par la commune de Cocody ;
- Zone 3 : constituée par la commune de Yopougon ;
- Zone 4 : constituée par la commune d'Abobo.

La zone 1 constitue la zone à alimenter par le projet à l'exception des communes du Plateau, d'Adjamé et d'Attecoubé.

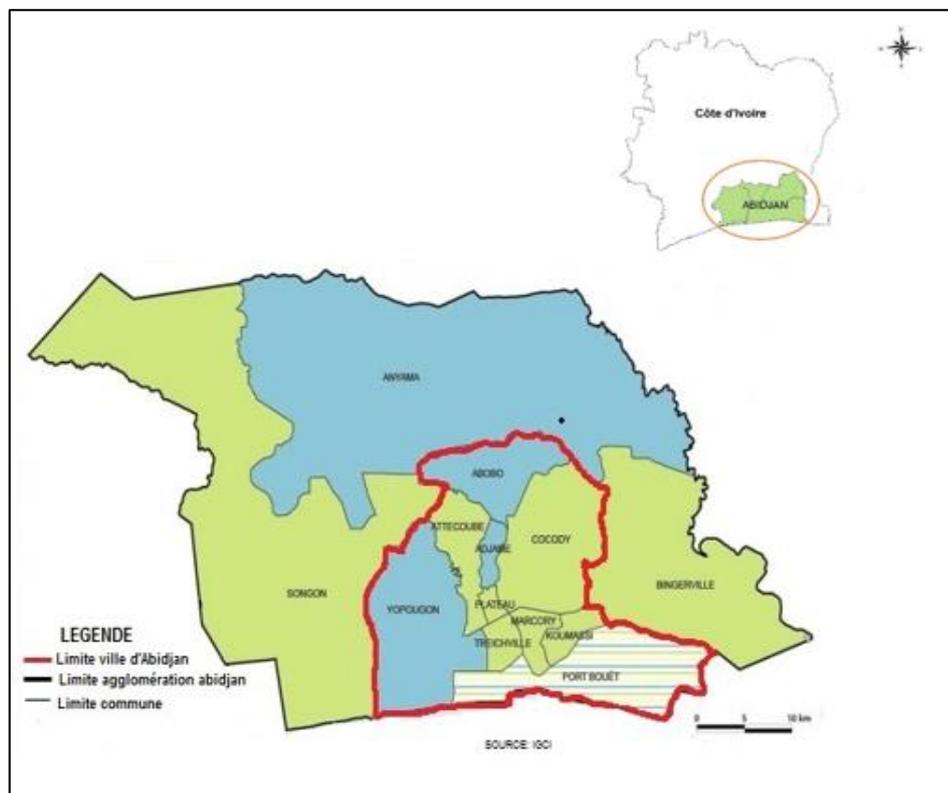


Figure 3 : Carte de Situation d'Abidjan en Côte d'Ivoire

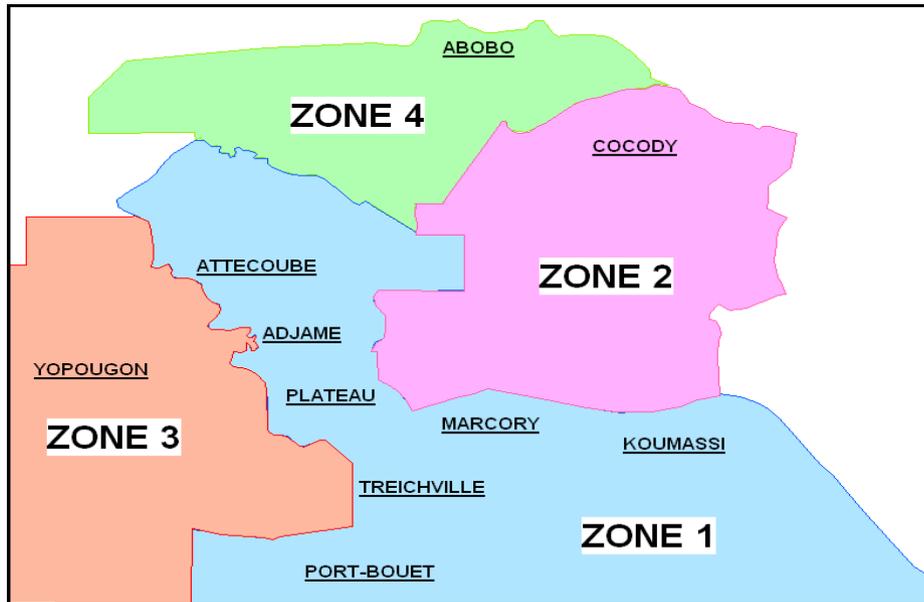


Figure 4 : Carte de zonage de la ville d'Abidjan selon la SODECI

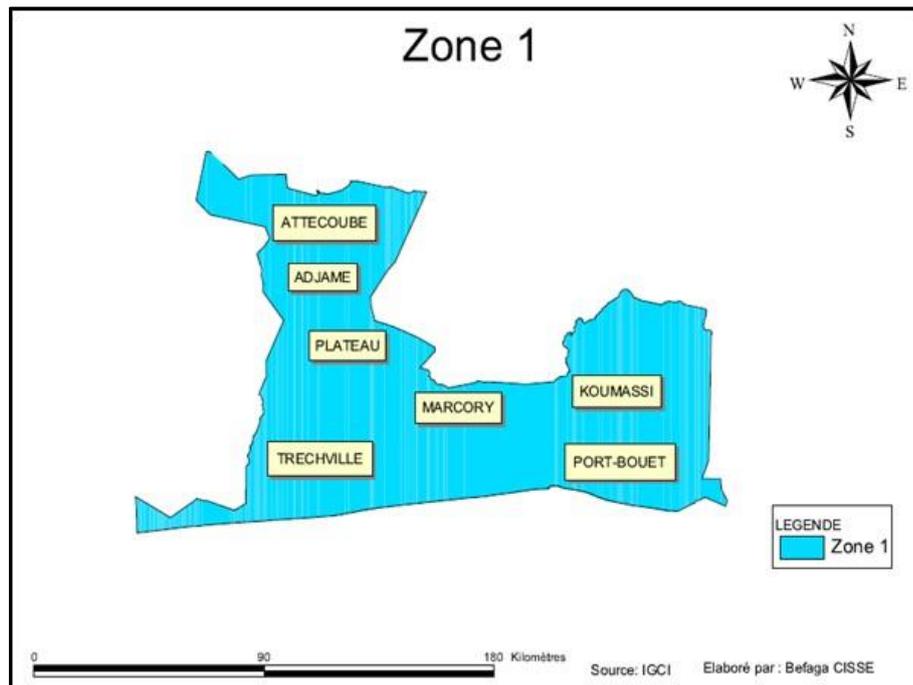


Figure 5 : Carte de la zone d'étude (zone 1) avec ses 7 communes

### III.1.2. Démographie

Abidjan, capitale économique de la Côte d'Ivoire, est la ville la plus peuplée de l'Afrique de l'Ouest francophone ; et elle connaît une forte croissance démographique. Les résultats des recensements démographiques des années 1998 et 2014 ont donné respectivement 2 877 948 et 4 395 243 habitants, soit une croissance moyenne annuelle de 2,7%.

L'institut National de la Statistique (INS) de la Côte d'Ivoire estime les populations futures de la zone 1 (zone de projet) comme suit (Arc Ingénierie, 2015) :

**Tableau 3 : Evolution de la population de la zone 1 à l'horizon 2029 (source INS)**

Année	2014	2019	2024	2029
<i>Adjamé</i>	372978	426123	486842	556211
<i>Attecoubé</i>	260911	298088	340563	389089
<i>Koumassi</i>	433139	494857	565369	645928
<i>Marcory</i>	249858	285460	326135	372606
<i>plateau</i>	7488	8555	9774	11167
<i>Port-Bouët</i>	419033	478741	546956	624892
<i>Treichville</i>	102580	117197	133896	152975
<i>Total</i>	1848001	2111040	2411558	2754896

### III.1.3. Description synoptique de la ligne de transfert AEP Abidjan Sud

La configuration la phase II consiste à :

- développer le champ captant d'ONO en réalisant et en équipant 7 forages à grand diamètre dont un forage en réserve ;
- développer le champ captant d'ABROBAKRO en réalisant et en équipant 11 forages à grand diamètre dont un forage en réserve ;
- réaliser une ligne de transfert d'eau brute raccordant les forages au site de traitement de l'eau situé à Bonoua à l'aide des conduites en fonte ductile à diamètre variable selon le débit transité ;
- réaliser une ligne de transfert d'eau traité reliant la station Bonoua à celle de Port-Bouet. Cette ligne est constituée de :
  - un réservoir au sol de capacité 5 000 m<sup>3</sup> à Bonoua alimenté par les champs captant ;
  - un poste de surpression à Moossou équipé d'une pompe de 4 000 m<sup>3</sup>/h ;

- une conduite en fonte ductile DN 900 reliant le réservoir de Bonoua au poste de surpresseur de 17 Km de long ;
- un réservoir au sol de 5 000 m<sup>3</sup> de capacité à la station de Port Bouët ;
- une conduite en fonte ductile DN 900 reliant le poste de surpresseur au réservoir de Port-Bouët de 29 Km de long.

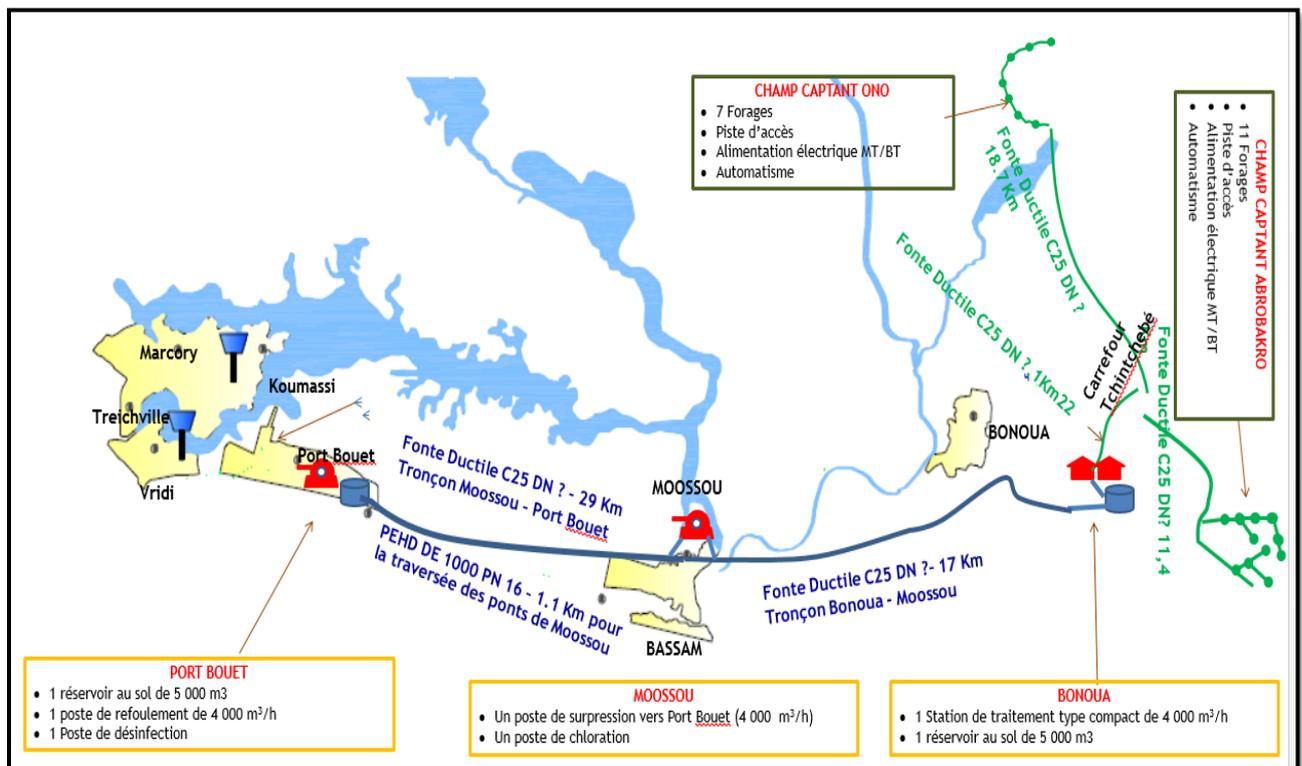


Figure 6 : Schéma de configuration de la ligne de transfert (Arc Ingénierie, 2015)

### III.2. Approche méthodologique

La démarche méthodologique qui a été adoptée pour atteindre nos objectifs a consistée fondamentalement à :

- Collecter et analyser la documentation nécessaire à l'étude ;
- Réaliser :
  - L'étude de configuration de la ligne de transfert d'eau potable ;
  - L'étude des grandeurs caractérisant le régime permanent ;
  - La modélisation de la ligne de transfert ;
  - La définition de scénarii à l'origine du coup de bélier ;
  - L'étude de simulation du régime transitoire de la ligne de transfert ;
  - L'étude des équipements de protection de la ligne de transfert.

### III.2.1. Définition du tracé de la ligne de transfert d'eau potable

Le tracé de la ligne de transfert d'eau potable a été effectué en imposant des valeurs de pente pour le tracé en plan :

- 0,2 % à 9 % pour les pentes ascendantes, facilitant les purges d'air ;
- 0,4 % à 9 % pour les parties descendantes, facilitant ainsi les vidanges du réseau.

Pour cette configuration, il a été nécessaire de placer certains équipements sur ladite ligne, à savoir :

- ventouses à triples fonctions à des points haut du réseau pour assurer l'aéragé (entrée de l'air dans le réseau), la sortie de l'air (désaéragé) et purge de l'air en pression (dégazage), et des vidanges ;
- les vidanges situées aux points bas du réseau pour vidanger le réseau en cas d'intervention ou servir de point de piquage pour des futures dessertes en route ;
- les vannes de sectionnements pour isoler le réseau en cas d'intervention

Le tracé a été effectué sous l'outil MENSURA (7.0) et les traitements correctifs ont été portés au tracé sous AutoCAD (2015).

### III.2.2. L'étude des grandeurs caractérisant le régime permanent sous CEBELMAIL

Cette étude permet d'avoir une idée sur le comportement hydraulique de la ligne de transfert et de vérifier l'état du réseau en régime permanent. La réalisation de cette étude a nécessité le pré dimensionnement :

- des collecteurs d'eau brute reliant les forages au réservoir de Bonoua ;
- de la ligne de transfert d'eau potable ;
- des électropompes des forages et du poste de surpresseur de Moossou ;

Le pré dimensionnement des conduites est fait par l'utilisation du modèle de pertes de charge de Darcy-Weisbach de l'équation (17.) intégré au logiciel CEBELMAIL. Pour ce faire, une condition de vitesse économique dans les conduites de refoulement prise entre 0,8 et 1,2 m/s a été imposée. Ce pré dimensionnement s'est effectué sur la base d'un débit de 250 m<sup>3</sup>/h par un forage soit un débit total de 4 000 m<sup>3</sup>/h.

Pour la modélisation de la ligne de transfert, il a été importé un tracé du réseau défini sous le modèle hydraulique EPANET vers l'interface de CEBELMAIL. Les caractéristiques de ce réseau à ce stade sont :

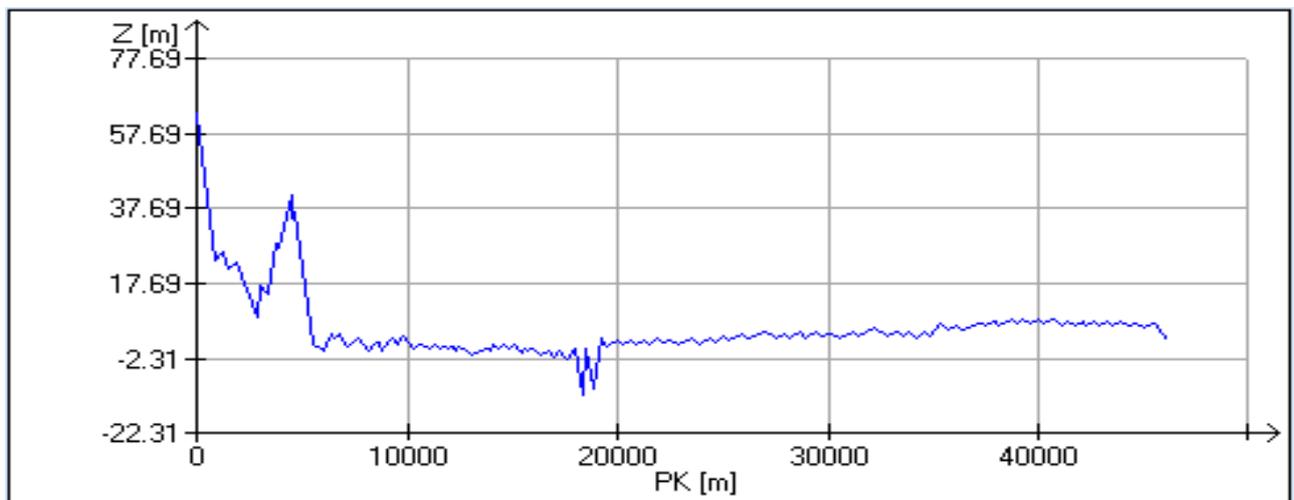
- 1 réservoir à Bonoua ;
- 1 réservoir à Port Bouet ;

- 18 réservoirs au champ captant représentant les forages ;
- 1 poste de surpression à Moossou équipé de deux pompes dont une en secours de débit nominal 4 000 m<sup>3</sup>/h ;
- 18 pompes pour les forages des champs captant.

Afin de minimiser le nombre de nœuds existants (auto-générés par le traitement sous AutoCAD), il a été procédé à une reconstitution du réseau directement sur CEBELMAIL avec des tronçons de canalisation d'au moins 100 m sans modifier la topologie (topographie et altimétrie) du réseau. Le réseau reconstitué est caractérisé par :

- 1 réservoir à Bonoua ;
- 1 réservoir à Port – Bouet modélisé par une cheminée déversante ;
- 1 poste de surpression à Moossou équipé d'une pompe de débit nominal 4000 m<sup>3</sup>/h ;
- 46 km de canalisation en fonte ductile DN 900 dont 17 km pour le bief 1 Bonoua-Moussou et 29 km pour le bief 2 Moossou – Port-Bouet.

Le profil en long du réseau reconstitué a une longueur totale de 47 km de la station de Bonoua à celle de Port-Bouet, avec une cote altimétrique maximum de 63,15 m à la sortie de station de Bonoua et un minimum de -12 m. la simulation du régime permanent s'est effectuée sur la base de ce profil.



**Graphique 1 : Profil en long du réseau reconstitué**

### III.2.3. Définition des scénarii à l'origine du coup de bélier

Les scénarii à l'origine du coup de bélier résultent des manœuvres volontaires ou involontaires sur l'exploitation du réseau, qui influencent le bon fonctionnement des installations hydrauliques en perturbant l'écoulement permanent. Pour cette étude, des scénarii spécifiques ont été inventoriés sur la ligne de transfert d'eau. Ces scénarii spécifiques identifiés sont ceux à forte probabilité d'occurrence d'apparition sur la ligne de transfert d'eau :

- l'arrêt ou le démarrage brusque de la pompe du poste de surpresseur de Moossou en pompage ;
- la fermeture progressive de la vanne située à l'entrée du réservoir de Port-Bouet en fonctionnement gravitaire.

- **Scénario 1 : arrêt ou disjonction de la pompe de Moossou**

L'arrêt de la pompe consiste à une disjonction de la pompe au temps  $t$  égale à une seconde due à une coupure brusque d'électricité. Suite à cette disjonction, le débit qui transite est brusquement interrompu : ce qui entraîne des dépressions et des surpressions sur le réseau principalement sur les conduites de refoulements qui peuvent occasionner la détérioration de la conduite.

- **Scénario 2 : démarrage de la pompe**

Le scénario démarrage de la pompe a été effectué au temps  $t$  égale à une seconde correspondant à un démarrage brusque de la pompe, ce démarrage brusque de la pompe affecte considérablement les conduites d'aspiration avec des dépressions fortes dans la canalisation d'où l'importance de leurs évaluations.

- **Scénario 3 : fermeture progressive de la vanne**

La fermeture d'une vanne peut se faire de façon instantané ou progressive, mais la fermeture brusque engendre plus d'effet sur le réseau. La fermeture provoque une variation de la pression et de la vitesse en fonction du temps, ce qui a pour effet au droit de la vanne une augmentation de la pression (surpressions) avec annulation de la vitesse.

### III.2.4. Etude de simulation du régime transitoire de la ligne de transfert

La simulation est effectuée pour chaque scénario à l'origine des coups de bélier séparément enfin d'évaluer les effets des régimes transitoires. Pour chaque scénario un calcul transitoire sans protection est réalisé qui permet d'évaluer les surpressions et les dépressions dans le réseau avant le choix du type de protection adéquat pour chaque manœuvre.

Le calcul du régime transitoire est réalisé en deux étapes dont :

- Un premier calcul à un temps court pour évaluer les risques des coups de béliers ;
- Un deuxième calcul à temps assez long du réseau protégé, pour s'assurer que les pressions restent dans la courbe enveloppe prédéfinie, car certains phénomènes apparaissent après un temps de calcul long.

Il a été défini un pas de temps de calcul de la simulation, le calcul du régime transitoire repose généralement sur la méthode des caractéristiques qui impose que l'onde de coup de bélier parcourt moins de la longueur de chaque conduite en un pas de temps. Mais l'algorithme spécifique de CEBELMAIL impose que l'onde parcourt moins du tiers de la longueur de chaque conduite en un pas de temps. Il a été choisi un pas de temps assez long pour faciliter les calculs. Dans le but de simplifier le calcul du régime transitoire le pas de temps choisi sera inférieur à ;

$$\frac{L_{min}}{3.C} \quad (21.)$$

Pour mener à bien cette étude, il a été défini également un certain nombre de paramètres sur le réseau :

- **Les catalogues des conduites**
  - Diamètres des conduites : 900 mm
  - La célérité : 1200 m/s
  - Coefficient de rugosité : 0,1 mm
  - Pression minimale admissible : 0 bar
  - Pression maximale admissible : 16 bars
- **Les paramètres numériques**
  - Durée du calcul : 600 s / 1000 s
  - Pas de temps de calcul : 0,025 s
- **Les constantes physiques**
  - Masse volumique : 1000 kg/m<sup>3</sup>
  - Pression atmosphérique : 10,33 m
  - Viscosité cinématique : 10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s
  - Pression de vapeur : 0,23 m
- **Les lois**

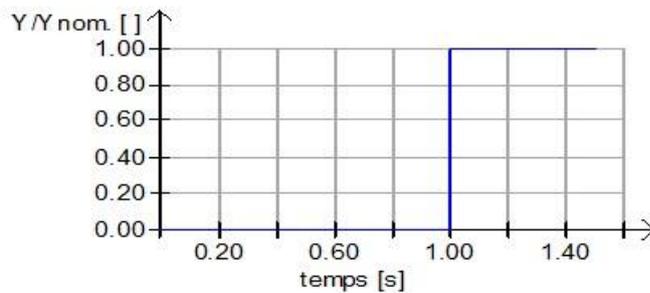
- Caractéristiques des vannes

Chaque type de vanne a ses caractéristiques, et cette caractéristique est liée à la loi des pertes de charge Loi DZ =  $k V^2/2g$ . Chaque position de la vanne correspond à un coefficient de perte k pour déterminer la perte de charge à cette position de la vanne. Voir annexe 1 pour les différentes valeurs de k en fonction de l'angle de fermeture de la vanne papillon utilisée dans notre étude.

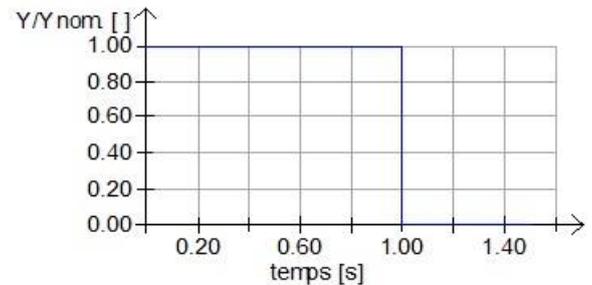
- Manœuvre des pompes et des vannes

Ce sont les lois liées aux manœuvres de la pompe et des vannes, qui ont été établies pour la simulation du modèle. Pour la pompe c'est la loi de disjonction à une seconde (1s) et le démarrage à une seconde (1s) qui ont été définies comme suit :

- Arrêt : 0
- Marche : 1



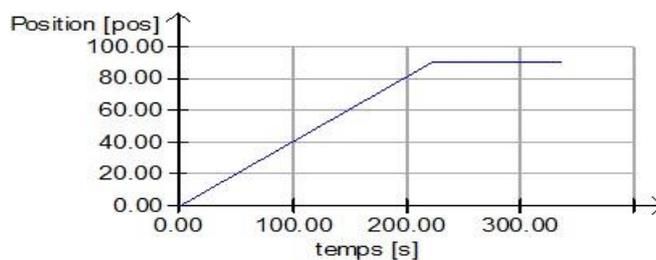
**démarrage\_t=1s**



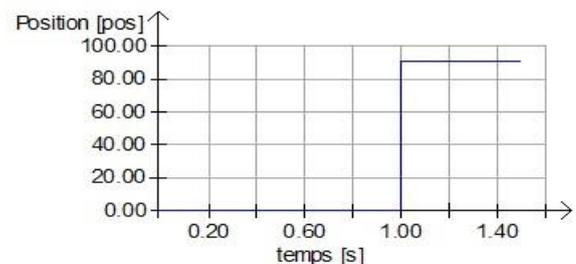
**disjonction\_t=1s**

### Graphique 2 : Lois des manœuvres des pompes

Les vannes choisies dans le modèle sont des vannes papillons dont la fermeture progressive dure 223 secondes. La fermeture de la vanne se fait à une vitesse et à un rythme voulu qui influence la réponse du réseau. Le rythme de fermeture est l'évolution de l'angle d'ouverture de la vanne en fonction du temps. La position zéro (0) correspond à l'ouverture totale de la vanne et la position 90 correspond à la fermeture complète de la vanne. Le graphique ci-dessous illustre ce rythme de fermeture.



**Ferm\_prog\_à\_t=1s\_sur\_223s**



**Ferm Brusque\_à\_t=1s**

### Graphique 3 : Lois de manœuvres de fermeture des vannes

### III.2.5. Etude des organes de protection anti-bélier

L'étude du choix de l'organe de protection à mettre en place pour limiter le coup de bélier à une valeur admissible sur la ligne de transfert a été fonction de l'enveloppe de surpression et de dépression générée par le coup de bélier pour les trois types de scénarii simulé. Pour chaque type de scénario, il sera proposé et dimensionné un organe de protection selon l'amplitude des surpressions et des dépressions sur le profil de la ligne de transfert.

Pour le calcul de la protection anti bélier, il a été d'abord identifié sur le profil de la ligne de transfert les zones de surpressions et de dépressions, pour chacun des scénarii, ensuite procéder au choix d'emplacement de l'organe avant leur dimensionnement. Après le choix et le dimensionnement de chaque organe de protection adéquat à chaque type de scénario, il a été effectué un calcul de simulation pour s'assurer du bon dimensionnement des équipements de protection. Pour l'étude, il a été proposé 3 types d'équipements de protection de la ligne de transfert selon chaque scénario qui sont :

- **Les ballons anti-bélier**

Les ballons anti-béliers sont les dispositifs les plus généralement utilisés dans les adductions d'eau potable pour limiter les surpressions et éviter la cavitation de la conduite (dépressions). Le dimensionnement du ballon c'est-à-dire la détermination de son volume et sa pression de pré gonflage s'est fait par un calcul successif, de sorte à obtenir les dimensions permettant de résoudre les variations de pressions (surpressions et dépressions) pendant les régimes transitoires (Chaoui, 2010). La pression de pré-gonflage est importante lors de la mise en œuvre du ballon anti-bélier et elle permet de réduire le volume du ballon anti-bélier.

- **Les soupapes anti-béliers**

Les soupapes de décharges sont choisies comme organe de protection pour écrêter les pressions fortes, dépassant les limites des enveloppes de la pression maximale admissible dans les canalisations. Il n'y a pas un dimensionnement spécifique des soupapes (Chaoui, 2010). L'élément le plus important est la pression de tarage de la soupape. Il a été choisi les soupapes dont la pression de tarage évolue entre 110 et 140 m, compte tenir de la pression maximale admissible dans le réseau.

- **Les ventouses dissymétriques**

Les ventouses dissymétriques sont les organes de purge d'air dont la section d'entrée et de sortie de l'air sont différentes (Kessal, 1987). Elles sont placées dans les différents points hauts du réseau.

## IV. RESULTATS

### IV.1. Synthèse de l'étude des grandeurs caractérisant le régime permanent

#### IV.1.1. Résultat de dimensionnement des conduites

Tableau 4 : Diamètres, vitesses et pertes de charges sur la ligne de transfert

Situation	Tronçons	Q (m <sup>3</sup> /h)	L (m)	D (mm)	V (m/s)	J (m)
Refolement	Ono_ carrefour Tchinchebe	1500	15695	700	1,08	46,41
	Abrobakro_carrefour Tchinchebe	2500	7535	800	1,37	27,36
	Carrefour Tchinchebe_Bonoua	4000	1220	900	1,75	3,07
	Bonoua _Port-Bouet	4000	46000	900	1,75	116,5
Ligne de transfert						

Dans les tronçons Abrobakro\_carrefour Tchinchebe et carrefour Tchinchebe\_Bonoua les conditions de vitesse économiques de refolement ne sont pas respectées, cela aura pour conséquence une augmentation de surpression sur ces tronçons. Pour les collecteurs des lignes de forage des champs, les diamètres des canalisations varient entre 300 et 700 mm pour champ captant d'ONO et allant de 300 à 800 mm en fonte ductile pour les champs captant d'ABROBAKRO. (Voir annexe 1 et 2 pour les détails de calcul).

#### IV.1.2. Résultat de dimensionnement des électropompes

Tableau 5 : Calcul de la pompe de surpresseur de Moossou

Débit (m <sup>3</sup> /h)	Hauteur géométrique (m)	Perte de charge (m)	HMT (m)	Puissance hydraulique (kW)
4000	-56, 50	116,50	60,00	654, 29

En ce qui concerne les électropompes des champs captant d'ONO :

- La HMT varie entre 147,23 et 186,34 m ;
- La puissance évolue également entre 100,30 à 131.18 kW.

Pour les champs d'ABROBAKRO :

- La HMT varie entre 40.58 à 111,98 m ;
- La puissance évolue également entre 27,65 à 76,28 kW.

Voir annexe 3 pour les détails des résultats complets.

### **IV.1.3. Résultat de la simulation du régime permanent sous CEBELMAIL**

A l'issue de cette simulation du régime permanent, il ressort :

- Un bon marnage du niveau d'eau dans le réservoir de Bonoua ;
- Une pression de 0,64 bars à la sortie du réservoir de Bonoua ;
- Une pression de 2,8 bars à l'entrée de la station de surpression de Moossou ;
- Une pression de 7,6 bars à la sortie de la station de surpression de Moossou ;
- 0.65 bars à l'entrée de la station de Port-Bouet.

Pour le calcul complet voir l'annexe 4.

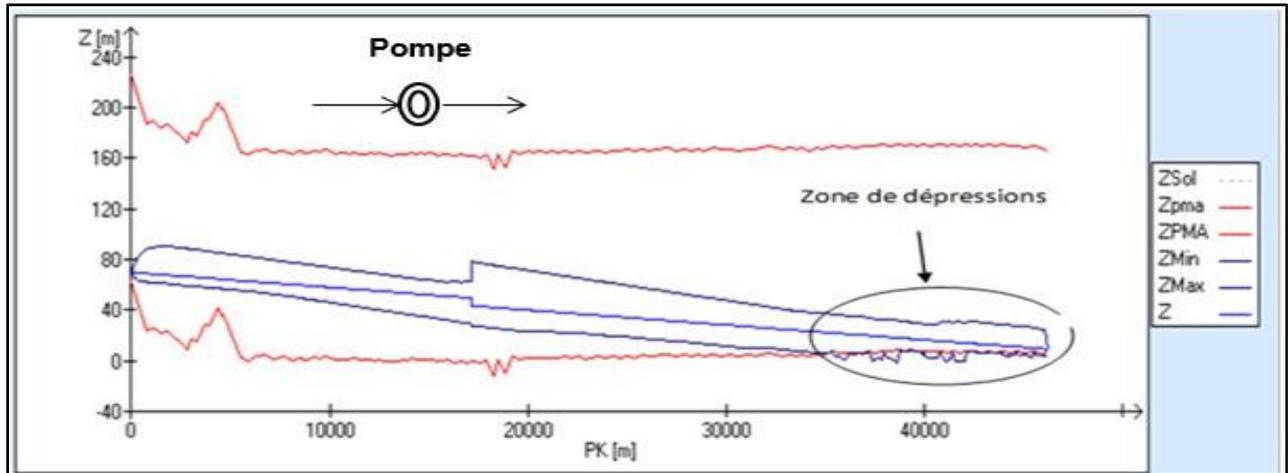
### **IV.2. Synthèse de l'étude du régime transitoire**

Nous présenterons l'ensemble de ces résultats de cette simulation du coup de bélier pour chaque scénario étudié, puis ensuite le choix et le dimensionnement des organes de protection et enfin la simulation du réseau protégé.

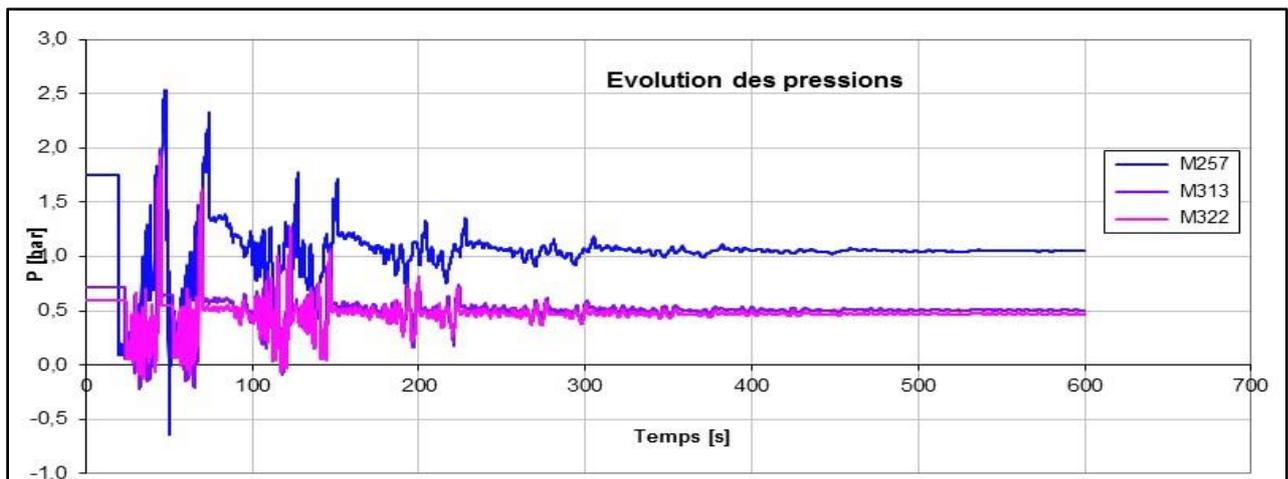
Pour chaque scénario, on présentera d'abord l'évolution des courbes enveloppes de pression sur le profil de la ligne de transfert, ensuite on présentera l'évolution des pressions à fonction du temps.

#### IV.2.1. Résultats de la simulation des scénarios étudiés

- Scénario 1 : Arrêt brusque de la pompe de Moossou



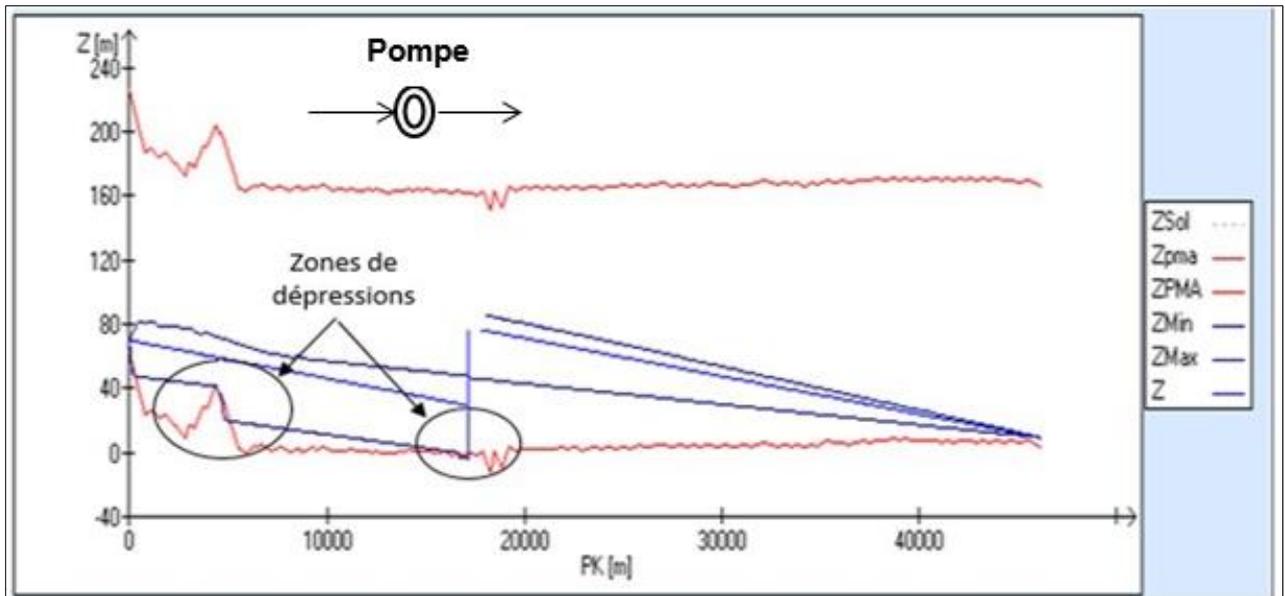
Graphique 4 : Evolution des courbes enveloppes de pression à l'arrêt de la pompe



Graphique 5 : Evolution des pressions aux nœuds à l'arrêt de la pompe

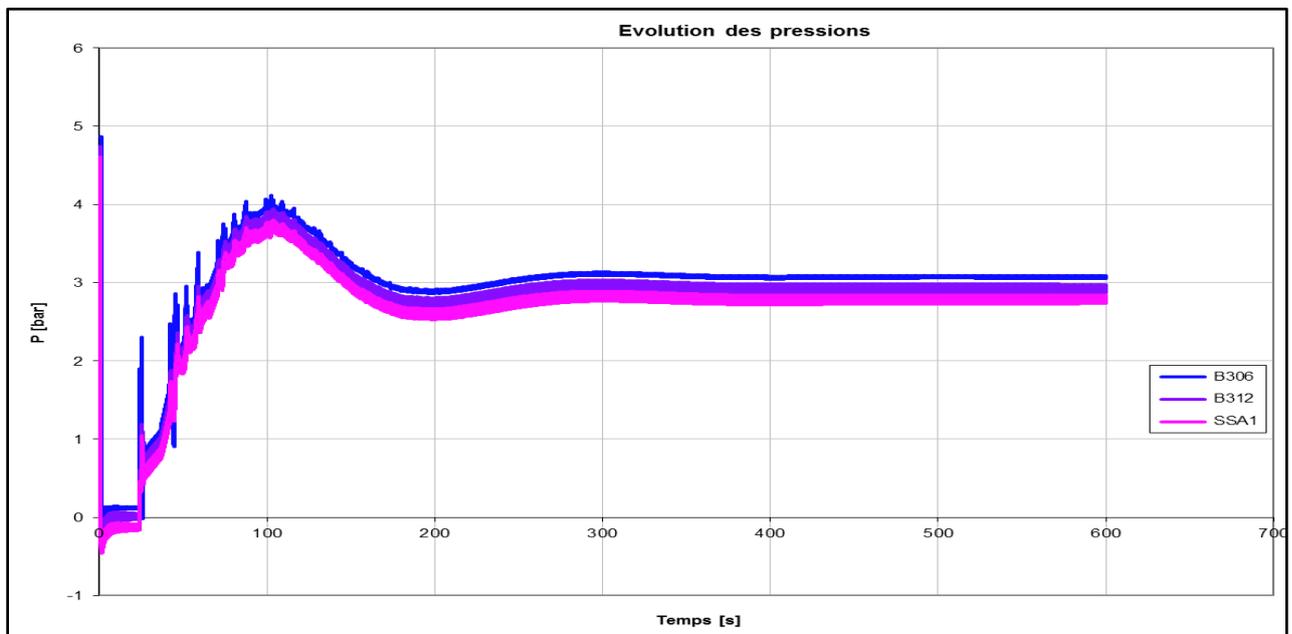
On remarque sur le graphique 4, qu'il y a dépressurisation de la canalisation principalement à l'aval de la pompe sur la conduite de refoulement à la fin du transitoire, cette dépressurisation atteint sa valeur maximale de moins 1 bar. La pression maximale atteinte pendant cette manœuvre est de 3 bars qui est inférieure à la pression maximale admissible de 16 bars, d'où pas de surpressions dans le réseau suite à l'arrêt de la pompe. Le graphique 5 montre l'évolution de la pression en fonction du temps, on constate que cette pression varie (oscille) beaucoup avant 300 secondes de calcul et le régime permanent s'établit jusqu'à la fin des calculs.

• Scénario 2 : Démarrage brusque de la pompe de Moossou



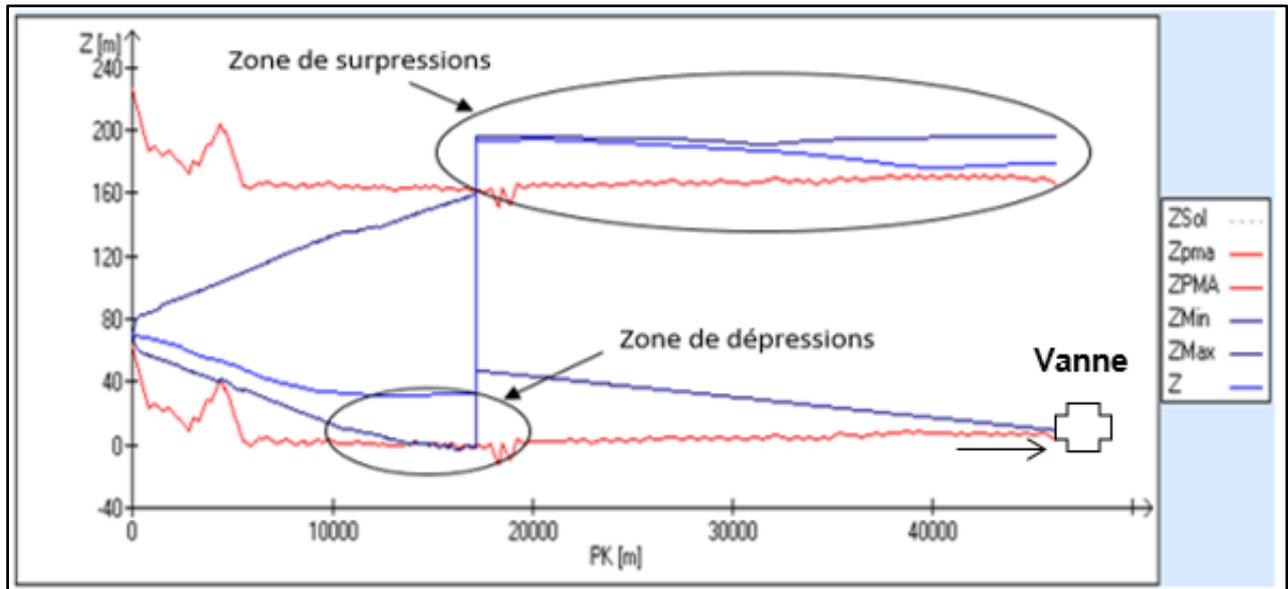
Graphique 6 : Enveloppes de dépressions et de surpressions au démarrage de la pompe

Il ressort de cette scénario, sur le profil de la ligne de transfert 2 zones de dépression à la fin des calculs. La première zone de dépression est située juste après le point le plus haut du réseau et la seconde zone à l'entrée de la station de surpression. Ces zones de dépressions s'expliquent du fait d'une grande longueur d'aspiration de la pompe.



Graphique 7 : Evolution des pressions aux nœuds au démarrage de la pompe

- **Scénario 3 : fermeture progressive de la vanne à l'entrée du réservoir de Port-Bouet**



**Graphique 8 : Enveloppes des surpressions et dépressions à la fermeture de la vanne**

En fonctionnement gravitaire de la ligne de transfert, on constate que le scénario de fermeture progressive de la vanne occasionne une zone de surpressions dans le réseau précisément à l'amont de la vanne, avec une amplitude de surpression allant de 17 à 22 bars sur une distance 30 Km à partir de vanne. Le graphique ci-dessus illustre l'évolution des enveloppes des surpressions et dépressions dans sur le profil du réseau de transfert.

En synthèse, l'étude des différents scénarii à permet d'appréhender sur le profil de la ligne de transfert d'eau potable, les effets des coups de bélier générés par les différents scénarii étudiés. Il ressort que, les scénarii d'arrêt brusque et de démarrage brusque de la pompe engendrent des ondes de dépressions sur le réseau de transfert. Quant au scénario de manutention de la vanne (fermeture progressive), ce sont des ondes surpressions qui ont été engendrées sur la ligne de transfert, précisément à l'amont de la vanne. L'amplitude des surpressions et des dépressions mise en jeu par chaque scénario ont des conséquences néfastes sur fonctionnement de la ligne de transfert. Suite à la détermination des enveloppes de surpression et de dépression créée par le coup de bélier dû à chaque scénario, il a été nécessaire de définir un type de protection à adapter aux différents scénarii étudiés selon l'ampleur du coup de bélier sur le profil du réseau de transfert d'eau potable.

#### IV.2.2. Synthèse de l'étude des organes de protection anti-bélier

On présentera les résultats issus de cette étude sous de tableau, donnant tous les caractéristiques de l'organe de protection choisi et dimensionné pour chaque scénario étudié.

- **Scénario 1 : Arrêt ou disjonction brusque de la pompe de Moossou**

L'organe de protection spécial choisi et dimensionné pour sécuriser le réseau suite au scénario de disjonction de la pompe a été un ballon anti-bélier. Les volumes optimisés du ballon anti-bélier en fonction de la réserve d'eau et de la pression de pré-gonflage sont consignés dans tableau ci-dessous.

**Tableau 6 : Les caractéristiques du ballon anti-bélier**

Volume (m3)	Reserve d'eau (m3)	Pré-gonflage (bar)
273	0	0
65	13	3,3
<b>100</b>	<b>40</b>	<b>2,2</b>
100	45	1,96
100	48	1,78
120	60	1,65
125	65	1,54
150	90	1,12
160	100	0,99
200	140	0,59
250	190	0,27

On remarque sur le tableau ci-dessus, que le volume initial du ballon anti-bélier après optimisation est de 275 m<sup>3</sup> sans réserve d'eau et sans pré-gonflage. Lorsque la pression de pré-gonflage du ballon diminue, plus la réserve d'eau et le volume du ballon augmente. Mais une pression de pré-gonflage trop élevée sera difficile pour son exécution. Il faut noter qu'un ballon anti-bélier de capacité supérieure à 100 m<sup>3</sup> sera compliqué du point de vu encombrement disponible à la station pour sa mise œuvre, donc il a été retenu pour ce scénario, un ballon anti-bélier de capacité 100 m<sup>3</sup> avec une réserve d'eau de 40 m<sup>3</sup> et pré-gonflé à 2,2 bars placé à la station de surpression de Moossou pour la sécurisation du réseau de transfert d'eau.

- **Scénario 2 : Démarrage de la pompe de Moossou**

Pour éviter les dépressions dans la conduite d'aspiration de la pompe (Bief Bonoua – Moossou), lors du démarrage de la pompe, il s'est avéré nécessaire de disposer deux ballons anti-bélier sur le bief 1. L'un des ballons est positionné au nœud BM58 (nœud suivant le point haut du bief après le réservoir de Bonoua) et l'autre au nœud BM 312 (entrée station de Moossou). Les caractéristiques des ballons sont les suivantes :

**Tableau 7 : Les caractéristiques des ballons anti-bélier sur le Bief Bonoua - Moossou**

Ballon anti-bélier	Nœuds	Volume (m <sup>3</sup> )	Réserve (m <sup>3</sup> )	Pré-gonflage (bar)
<i>BABO</i>	BM58	5,00	0,00	0,00
<i>BABA</i>	BM312	10,00	0,00	0,00

- **Scénario 3 : Fermeture progressive de la vanne à l'entrée du réservoir de Port-Bouet**

En transfert gravitaire, pour écrêter les surpressions survenant dans le réseau précisément à l'amont de la vanne, lors du scénario fermeture progressive de la vanne de Port Bouët, l'organe de protection adéquat dimensionné a été des soupapes de décharges sur la ligne de transfert. Le tableau suivant présente la position de ces soupapes ainsi que leurs caractéristiques.

**Tableau 8 : caractéristiques des soupapes**

Soupapes	Nœuds	Pression de décharge (bars)	Débit pleine ouverture (m <sup>3</sup> /h)
<i>SSS1</i>	MP11	12	2340
<i>SPB1</i>	MP346	16	2700
<i>SPB2</i>	MP346	16	2700

Le tableau ci-dessous présente une synthèse des différents organes spéciaux dimensionnés pour la protection de la ligne transfert d'eau contre les effets de coup de bélier généré à l'issue des différents scénarii étudiés.

Tableau 9 : Synthèses des organes spéciaux de protection du réseau

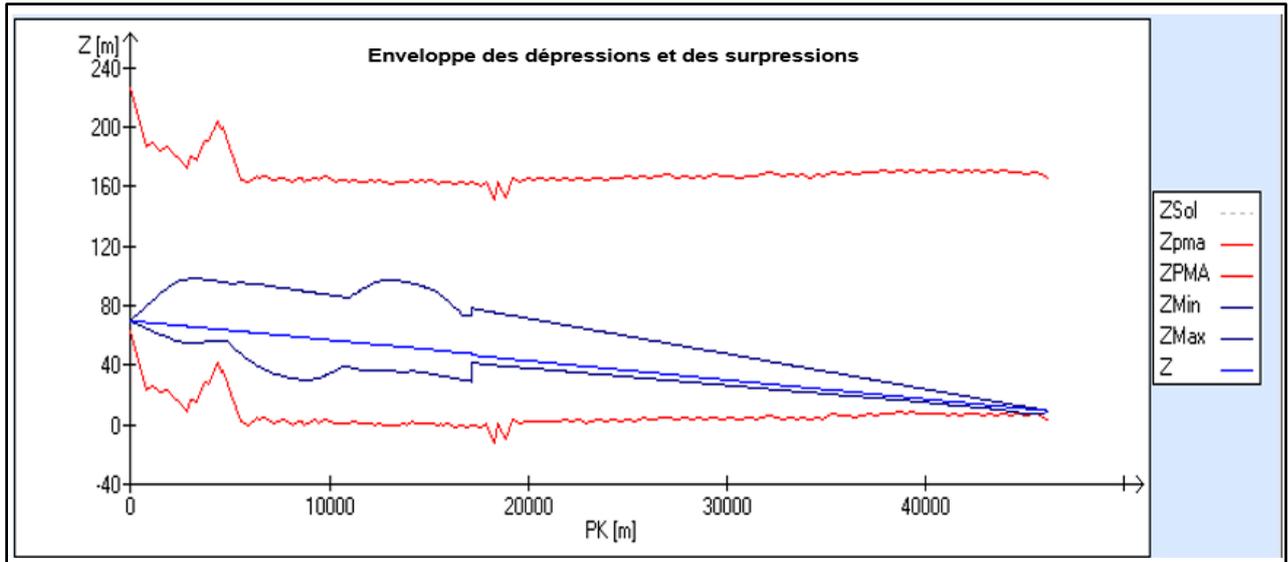
Bief	Organes	Nœuds	Cotes(m)	Caractéristiques
<b>Bonoua</b>	Ventouses dissymétriques	BM11	26,33	Ventouse par alpha : alpha 1 = 2880 Alpha 2 = 0,61
		BM56	41,8	
		BM186	1,25	
<b>Moossou</b>	Ballon anti- bélier	BABO au nœud BM58	Zsol : 35,35 Zbase : 37,5	Volume = 5 m3
		BABA BM312	Zsol : -0,80 Zbase : 1,90	Volume = 10 m3
<b>Moossou</b> - <b>Port</b> <b>Bouet</b>	Ventouses dissymétriques	MP1	-0,8	Ventouse par alpha : alpha 1 = 2880 Alpha 2 = 0.61
		MP42	0,31	
		MP164	4,03	
		MP255	8,39	
		BABR à la station de Moossou	Zsol : 0,70 Zbase : 2,5	
Soupape	MP11	-2,54	Pression de décharge = 12 bar Débit pleine ouverture = 2340	
	MP346	2,50	Pression de décharge = 16 bar	
	MP346	2,50	Débit pleine ouverture = 2700	

#### IV.2.3. Synthèse de l'étude de la ligne de transfert protégée

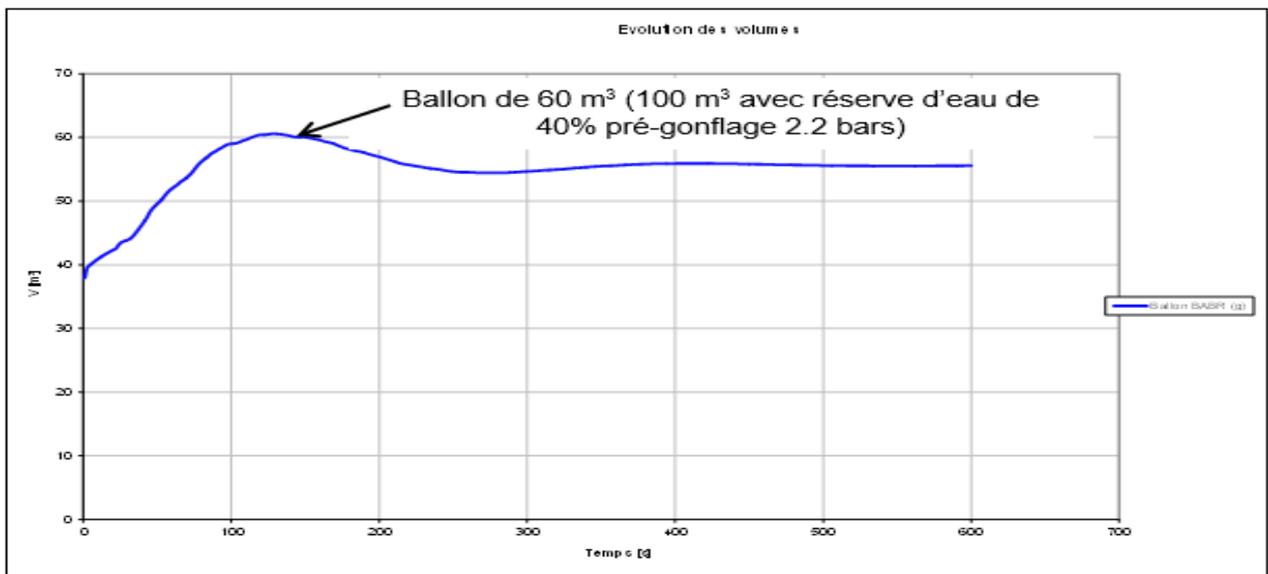
Ces résultats seront présentés sous forme de graphiques montrant le fonctionnement du réseau avec la présence des organes spéciaux de protection en régime transitoire, c'est-à-dire l'évolution des courbes enveloppes de dépressions et de surpressions pour chaque scénario étudié et l'évolution du volume dans les ballons anti-bélier.

• **Scénario 1 : Arrêt ou disjonction de la pompe de Moossou**

Sur le graphique ci-dessous, on remarque qu'avec la présence d'un ballon anti-bélier de 100 m<sup>3</sup> placé à la station de surpression de Moossou, il n'y a plus apparition de zone de dépression sur le profil du réseau de la ligne de transfert, d'où le volume du ballon anti-bélier dimensionnée est suffisante pour protéger la ligne de transfert pendant l'arrêt ou la disjonction de la pompe. Les courbes enveloppes de dépressions et de surpressions sont incluses dans l'enveloppe des pressions admissibles définies.



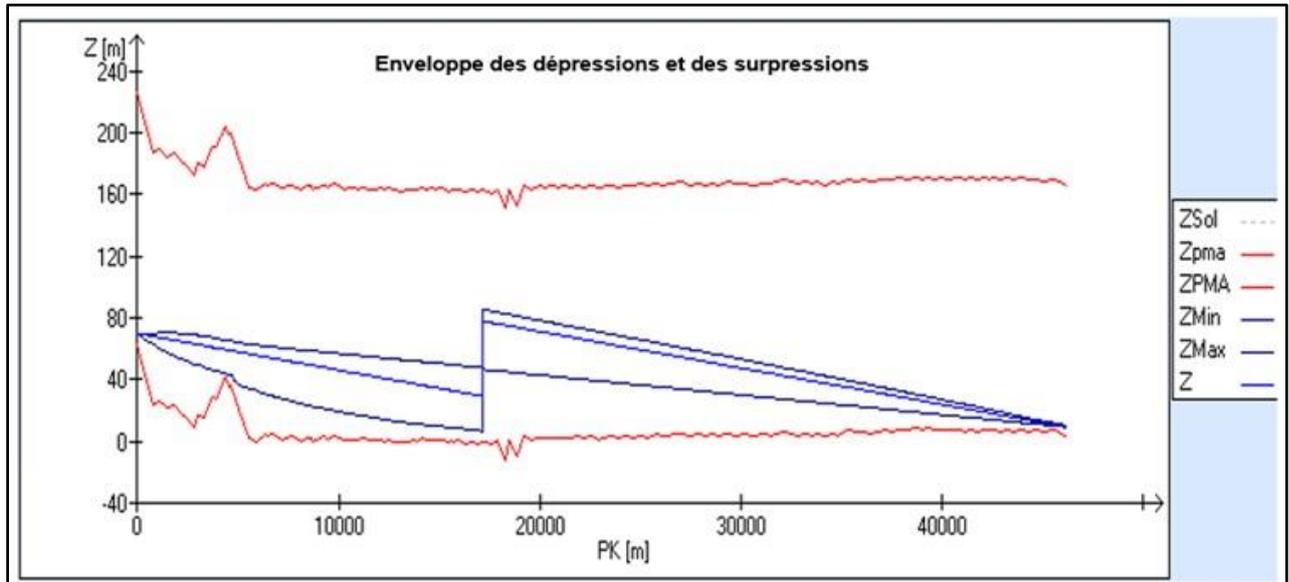
**Graphique 9 : Protection par ballon anti-bélier de 100 m<sup>3</sup> et ventouse dissymétrique**



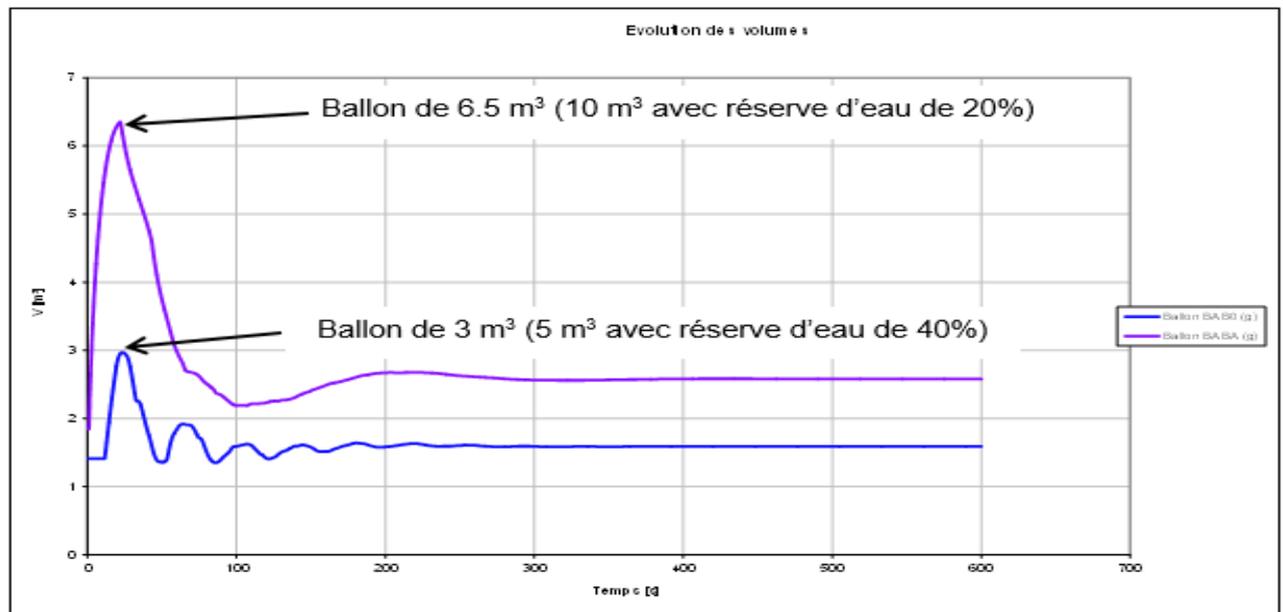
**Graphique 10 : Evolution des volumes dans le ballon pendant l'arrêt de la pompe**

• **Scénario 2 : Démarrage de la pompe de Moossou**

Le graphe ci-dessous présente le résultat des études transitoires avec une protection combinée par ballon anti-bélier et ventouses dissymétriques. La présence de ventouse dissymétrique permet d'optimiser le dimensionnement du ballon anti-bélier. Avec cette protection combinée du réseau on constate qu'à la fin de l'étude transitoire, il n'y a plus d'apparition de dépressions dans le réseau.

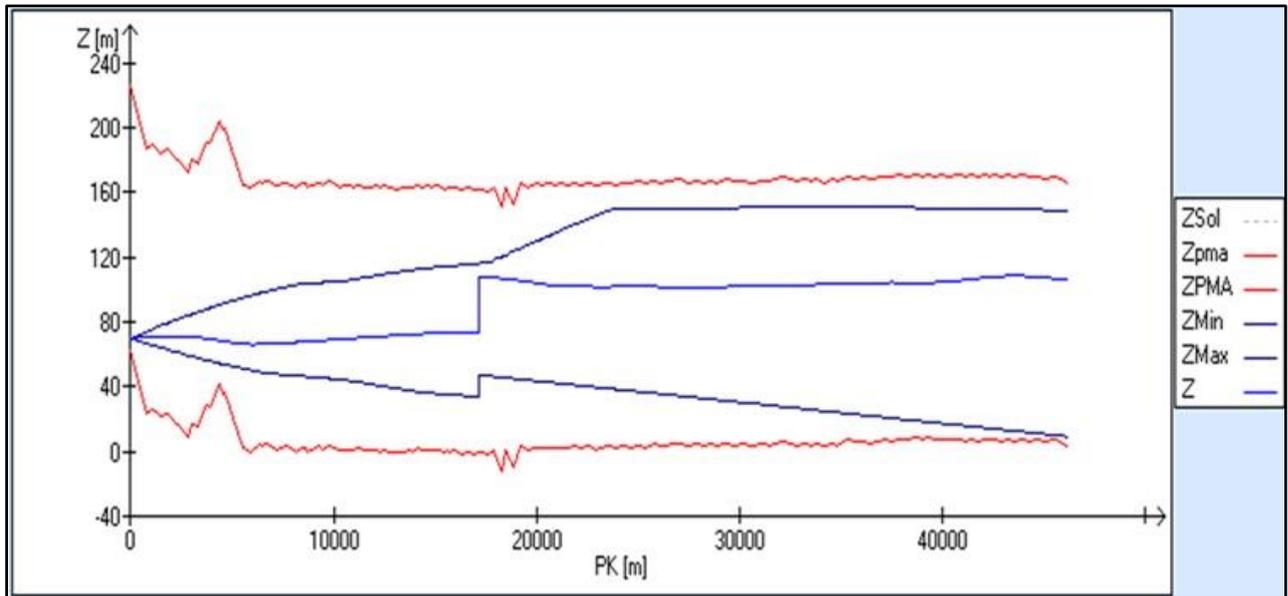


Graphique 11 : Protection par deux ballons de 10 m<sup>3</sup> et de 5 m<sup>3</sup> plus ventouse dissymétrique



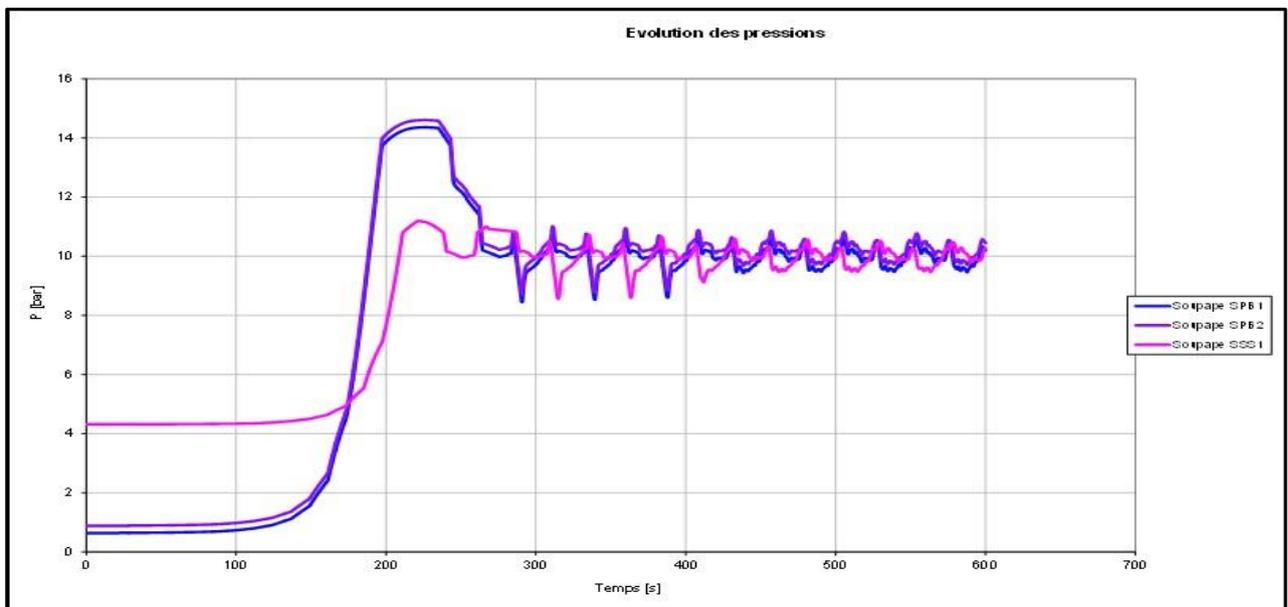
Graphique 12 : Evolution des volumes dans les ballons au démarrage de la pompe

- **Scénario 3 : Fermeture progressive de la vanne à l'entrée du réservoir de Port-Bouet**



**Graphique 13 : Protection par trois soupapes anti-bélier**

On remarque ainsi que les soupapes anti-bélier sont particulièrement bien adaptés lorsque les transitoires commencent par des surpressions. Le graphe ci-dessus illustre bien leurs fonctions car les enveloppes de surpressions sont inférieures à celles des pressions maximales admissibles (PMA) du réseau.



**Graphique 14 : Evolution des pressions dans les soupapes à la fermeture de la vanne**

---

## V. CONCLUSION

---

La présente étude intitulée « modélisation et simulation du régime transitoires dans le cadre du projet AEP Abidjan Sud (en phase II) : cas d'application du logiciel CEBELMAIL » a nécessité la définition des différents scénarii manutention à l'origine du coup de bélier, à forte probabilité d'occurrence d'apparition sur la ligne de transfert. Il s'agit des scénarii de disjonction et de démarrage de la pompe de surpresseur de Moossou et le scénario de manutention de la vanne située à l'entrée du réservoir de Port-Bouet. Il ressort de cette étude que les différents scénarii étudiés engendrent des amplitudes très importantes de coup de bélier sur le réseau de transfert. Suite à cela il a été jugé nécessaire la proposition et le dimensionnement pour chaque scénario étudié, un type de protection adéquat de la ligne de transfert, en fonction des courbes enveloppes de surpression et dépression générée par chaque scénario sur le profil du réseau de transfert. De ce fait l'organe de protection anti-bélier mise en œuvre pour limiter les effets du coup de bélier, pendant les scénarii d'arrêt ou de disjonction et de démarrage de pompe de Moossou a été 3 ballons anti-bélier. Pour le scénario d'arrêt de la pompe, le volume du ballon anti-bélier est 100 m<sup>3</sup> placé au poste de surpression, précisément sur la conduite de refoulement. Ensuite les volumes des ballons anti-bélier pour le scénario de démarrage de la pompe, sont respectivement 10 et 5 m<sup>3</sup> disposés sur la conduite d'aspiration. De même l'équipement de protection proposé pour le scénario de fermeture de la vanne de Port-Bouet est constitué de 3 soupapes anti-bélier.

---

## **VI. RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES**

---

Pour la pérennité et le bon fonctionnement de la ligne de transfert d'eau potable, les équipements de protections anti-bélier dimensionnés pour chaque type de scénarii de manutentions de coup de bélier doivent faire l'objet d'un suivi et entretien régulier. De ce fait nous recommandons :

- ✚ Que chaque organe de protection soit disposé à leurs emplacement exact prévu dans les résultats de simulation ;
- ✚ Que l'exploitant du réseau veille à ce que les ballons anti-béliers soient isolés lors du fonctionnement gravitaire de la ligne de transfert afin de ne pas poser de dommage à ceux-ci ;
- ✚ Il faudra un suivi et entretien régulier du réseau et l'ensemble de ses équipements hydrauliques ;
- ✚ Lors de la mise en service du ballon, s'assurer que la pression de pré gonflage soit inférieure à la pression dans la canalisation au niveau du branchement du ballon anti-bélier ;
- ✚ La station de surpression doit être équipée d'un compresseur, pour la mise en pression des ballons anti-bélier ;
- ✚ Suite à un scénario de coup de bélier, il faudra vérifier la pression de service du ballon anti-bélier, si cette pression n'est pas conforme à celle définir par le dimensionnement, il faudra donc la pré-gonflé à l'aide du compresseur avant la mise en marche de la pompe ;
- ✚ Réaliser l'étude des scénarii de coup de bélier pouvant apparaitre sur le réseau à l'amont de la ligne de transfert d'eau potable, afin de disposer les organes de protection adéquats car cela pourra impacter la ligne de transfert.

## VII. BIBLIOGRAPHIE

---

- Arc Ingénierie. (2015). *Etude d'Avant-Projet Détaillé de l'alimentation en eau potable d'Abidjan Sud à partir de la nappe du Sud Comoé*. Abidjan.
- Bergeron, L. (1950). *Du coup de bélier en hydraulique ou coup de foudre en électricité*. Paris: Dunod.
- Biaou, A. (2009). *Cours d'hydraulique, Ecoulement en charge*. Ouagadougou: 2iE.
- Chaoui, S. (2010). *Contribution à l'étude des écoulements transitoires en charge, Mémoire de Magistère en Hydraulique*. Alger: Université El Hadj Labbdar.
- Cote, B. (1998). *Influence du choix du matériau d'une conduite sur le coup de bélier*. Montréal: CERIU.
- Guhl, F. (2002). *Guide méthodologique d'études anti – bélier pour les réseaux d'eau*.
- Kessal, M. (1987). *Modélisation en écoulement homogène, des phénomènes de cavitation lors des régimes transitoires en conduite, Thèse de Docteur- Ingénieur en Mécanique*. Lyon: INSA.
- Lencastre, M. (1996). *Manuel d'Hydraulique Générale*. Paris: Eyrolles.
- Mar, A. L. (2009). *Cours d'hydraulique, écoulement non permanents*. EIIE-ETSHER.
- Mercier, A. (2001). *Influence du choix du matériau de la conduite sur la réponse en régime transitoire de système d'adduction*. Sherbrooke: Université de SHERBROOKE.
- Meunier, M. (1980). *Les coups de bélier et la protection des réseaux d'eau sous pression*. Paris: ENGREF.
- Mounirou, A. L. (2014). *Essentiel des Ecoulements non permanents en Charge et à Surface libre*. Ouagadougou: 2iE.

---

## ANNEXES

---

<b>ANNEXE 1 : DIAMETRE ET PERTES DE CHARGES DANS LES CONDUITES DU CHAMP CAPTANT D'ABROBAKRO .....</b>	<b>II</b>
<b>ANNEXE 2 : DIAMETRE, VITESSE ET PERTE DE CHARGE DANS LE RESEAU AU CHAMP CAPTANT D'ONO .....</b>	<b>II</b>
<b>ANNEXE 3 : DIMENSIONNEMENT DES ELECTROPOMPES.....</b>	<b>III</b>
3.1.    LES ELECTROPOMPES DES FORAGES DES CHAMPS CAPTANT D'ABROBAKRO .....	III
3.2.    LES ELECTROPOMPES DES FORAGES DES CHAMPS CAPTANT D'ONO .....	III
<b>ANNEXE 4 : EVOLUTION DE LA CHARGE ET DE LA PRESSION AUX NŒUDS AU REGIME PERMANENT .....</b>	<b>IV</b>
<b>ANNEXE 5 : CARACTERISTIQUES DES VANNES - LOI <math>DZ = K V^2/2G</math> _ PAPILLON_ (STANDARD) .....</b>	<b>V</b>
<b>ANNEXE 6 : HMT DES POMPES (POINTS CONSTRUCTEURS) _ POMPE_FLOWSERVE.....</b>	<b>V</b>
<b>ANNEXE 7 : SUIVI DES EVENEMENTS DANS LE RESEAU A LA FERMETURE DE VANNE .....</b>	<b>VI</b>
<b>ANNEXE 8 : SUIVI DES EVENEMENTS DANS LE RESEAU AU DEMARRAGE DE LA POMPE SANS BALLON ANTI-BELIER.....</b>	<b>VII</b>
<b>ANNEXE 9 : CHAMPS CAPTANT D'ABROBAKRO .....</b>	<b>VIII</b>
<b>ANNEXE 10 : CHAMPS CAPTANT D'ONO .....</b>	<b>IX</b>
<b>ANNEXE 11 : VUE EN PLAN DU RESEAU .....</b>	<b>X</b>
9.1.    BIEF BONOUA – MOOSSOU .....	X
9.2.    STATION DE SURPRESSION DE MOOSSOU .....	XI
9.3.    BIEF MOOSSOU – PORT BOUET .....	XII
9.4.    BIEF MOOSSOU – PORT BOUËT (SUITE) .....	XIII
<b>ANNEXE 12 : PROFIL EN LONG DU RESEAU.....</b>	<b>XIV</b>
10.1.    BIEF BONOUA – MOOSSOU .....	XIV
10.2.    BIEF MOOSSOU – PORT BOUET .....	XV
<b>ANNEXE 14 : EVOLUTION DES PRESSIONS DANS LE BALLON BABR A LA DISJONCTION DE LA POMPE .....</b>	<b>XVI</b>
<b>ANNEXE 15 : EVOLUTION DES DEBITS DANS LA POMPE A LA DISJONCTION .....</b>	<b>XVII</b>
<b>ANNEXE 16 : EVOLUTION DES DEBITS DANS LES CONDUITES A LA DISJONCTION DE LA POMPE.....</b>	<b>XVIII</b>
<b>ANNEXE 18 : EVOLUTION DES PRESSIONS DANS LES BALLON AU DEMARRAGE DE LA POMPE.....</b>	<b>XIX</b>
<b>ANNEXE 19 : EVOLUTION DES DEBITS DE LA POMPE AU DEMARRAGE .....</b>	<b>XX</b>
<b>ANNEXE 20 : EVOLUTION DES DEBITS DANS LES SOUPAPES A LA FERMETURE DE LA VANNE.....</b>	<b>XXI</b>

**Annexe 1 : Diamètre et pertes de charges dans les conduites du champ captant d'Abrobakro**

tronçons	Longueur (m)	Débit (m <sup>3</sup> /h)	Diamètre retenu (mm)	Vitesse (m/s)	Pertes de charge linéaire (m)	Pertes de charge singulières (m)	Pertes de charge totales(m)
<i>F1 à F2</i>	579	250	300	0,98	1,66	0,17	1,82
<i>F2 à F9</i>	578	500	400	1,11	1,46	0,15	1,61
<i>F5 à ALCSd1</i>	546	250	300	0,98	1,56	0,16	1,72
<i>F6 à ALCSd1</i>	385	250	300	0,98	1,10	0,11	1,21
<i>ALCSd1 à ALCP14</i>	244	500	400	1,11	0,62	0,06	0,68
<i>F9 à ALCP14</i>	60	750	500	1,06	0,11	0,01	0,12
<i>F7 à F8</i>	452	250	300	0,98	1,29	0,13	1,42
<i>F8 à ALCP14</i>	302	500	400	1,11	0,76	0,08	0,84
<i>ALCP14 à ALCP16</i>	235	1250	600	1,23	0,44	0,04	0,49
<i>ALCP16 à F10</i>	529	1750	700	1,26	0,88	0,09	0,97
<i>F10 à F11</i>	960	2000	700	1,44	2,06	0,21	2,27
<i>F3 à F4</i>	591	250	300	0,98	1,69	0,17	1,86
<i>F4 à ALCP30</i>	1505	500	400	1,11	3,80	0,38	4,18
<i>F11 à ALCP30</i>	869	2250	800	1,24	1,19	0,12	1,31

**Annexe 2 : Diamètre, vitesse et perte de charge dans le réseau au champ captant d'Ono**

Tronçons	Longueur (m)	Débit (m <sup>3</sup> /h)	Diamètre retenu (mm)	Vitesse (m/s)	Pertes de charge linéaire (m)	Pertes de charge singulière (m)	Pertes de charge totales (m)
<i>OF1 à OF2</i>	480	250	300	0,98	1,37	0,14	1,51
<i>OF2 à OLCP1</i>	48	250	300	0,98	0,14	0,01	0,15
<i>OLCP6 à OLCP11</i>	487	500	400	1,11	1,23	0,12	1,35
<i>OF3 à OLCP11</i>	50	250	300	0,98	0,14	0,01	0,16
<i>OLCP11 à OLCP16</i>	357	750	500	1,06	0,64	0,06	0,70
<i>OF4 à OLCP16</i>	40	250	300	0,98	0,11	0,01	0,13
<i>OLCP16 à AEP1142</i>	735	1000	600	0,98	0,91	0,09	1,00
<i>OF5 à AEP1142</i>	201	250	300	0,98	0,58	0,06	0,63
<i>AEP1142 à OLCP25</i>	277	1250	600	1,23	0,52	0,05	0,58
<i>OF6 à OLCP25</i>	65	250	300	0,98	0,19	0,02	0,20
<i>OLCP25 à OLCP29</i>	523	1500	700	1,08	0,65	0,06	0,71
<i>OF7 à OLCP29</i>	590	250	300	0,98	1,69	0,17	1,86
<i>OLCP21 à OCT1</i>	148	1750	700	1,26	0,25	0,02	0,27

**Annexe 3 : Dimensionnement des électropompes****3.1. Les électropompes des forages des champs captant d'Abrobakro**

<b>Pompe</b>	<b>Débit pompé (m3/h)</b>	<b>Hauteur géométrique(m)</b>	<b>Perte de charge (m)</b>	<b>HMT (m)</b>	<b>Puissance hydraulique (KW)</b>
<b>1 (AF1)</b>	250	26,02	25,586	<b>51,61</b>	35,16
<b>2 (AF2)</b>	250	16,82	23,763	<b>40,58</b>	27,65
<b>3 (AF3)</b>	250	52,03	23,044	<b>75,07</b>	51,14
<b>4 (AF4)</b>	250	50,00	21,185	<b>71,18</b>	48,49
<b>5 (AF5)</b>	250	87,54	24,437	<b>111,98</b>	76,28
<b>6 (AF6)</b>	250	78,98	23,930	<b>102,91</b>	70,11
<b>7 (AF7)</b>	250	62,82	23,812	<b>86,63</b>	59,02
<b>8 (AF8)</b>	250	75,36	22,388	<b>97,75</b>	66,59
<b>9 (AF9)</b>	250	89,32	22,156	<b>111,48</b>	75,94
<b>10 (AF10)</b>	250	74,98	20,584	<b>95,56</b>	65,10
<b>11 (AF11)</b>	250	46,08	18,316	<b>64,40</b>	43,87

**3.2. Les électropompes des forages des champs captant d'Ono**

<b>Pompe</b>	<b>Débit pompé (m3/h)</b>	<b>Hauteur géométrique(m)</b>	<b>Perte de charge (m)</b>	<b>HMT (m)</b>	<b>Puissance hydraulique (kW)</b>
<b>1 (OF1)</b>	250	120,9	71,66	<b>192,56</b>	131,18
<b>2 (OF2)</b>	250	109,84	70,30	<b>180,14</b>	122,72
<b>3 (OF3)</b>	250	96,23	68,95	<b>165,18</b>	112,53
<b>4 (OF4)</b>	250	79,01	68,22	<b>147,23</b>	100,30
<b>5 (OF5)</b>	250	95,1	67,73	<b>162,83</b>	110,93
<b>6 (OF6)</b>	250	101,6	66,72	<b>168,32</b>	114,67
<b>7 (OF7)</b>	250	118,67	67,67	<b>186,34</b>	126,94

**Annexe 4 : Evolution de la charge et de la pression aux nœuds au régime permanent**

Nœuds	Charge hydraulique (m)	Pression (bars)
<i>B11</i>	66.95	3.98
<i>B160</i>	49.54	4.65
<i>B206</i>	41.63	4.02
<i>B235</i>	39.40	3.89
<i>B269</i>	34.47	3.35
<i>B302</i>	30.05	2.97
<i>FL1</i>	75.34	8.60
<i>M11</i>	76.89	7.79
<i>M212</i>	38.46	3.30
<i>M200</i>	40.92	3.66
<i>SSA1</i>	28.92	2.78
<i>SSR1</i>	78.01	7.58
<i>B172</i>	47,00	4,52
<i>B175</i>	45,98	4,22
<i>B176</i>	45,45	4,34
<i>B178</i>	44,69	4,04
<i>B185</i>	43,38	4,21
<i>B186</i>	42,91	4,09
<i>B189</i>	42,10	4,04
<i>M175</i>	46,49	4,24
<i>M177</i>	45,46	4,01
<i>M178</i>	44,85	4,09
<i>M180</i>	43,78	3,83
<i>M181</i>	43,11	3,89
<i>M184</i>	41,84	3,67
<i>M186</i>	41,17	3,72
<i>M190</i>	39,62	3,43

**Annexe 5 : Caractéristiques des vannes - Loi  $DZ = k V^2/2g$  \_ papillon\_ (standard)**

Position [pos]	k [ ]
0	0
5	0.24
10	0.52
15	0.9
20	1.54
30	3.91
35	6.22
40	10.8
45	18.7
50	32.6
55	58.8
60	118
65	256
70	750
75	3350
90	1.00E+20

**Annexe 6 : HMT des pompes (points constructeurs) \_ POMPE\_FLOWSERVE**

Q [m <sup>3</sup> /h]	Z [m]
0	68
500	66.5
1000	65.5
1500	64
2000	62
2500	60
3000	57
3500	54
4000	50
4500	45
5000	40

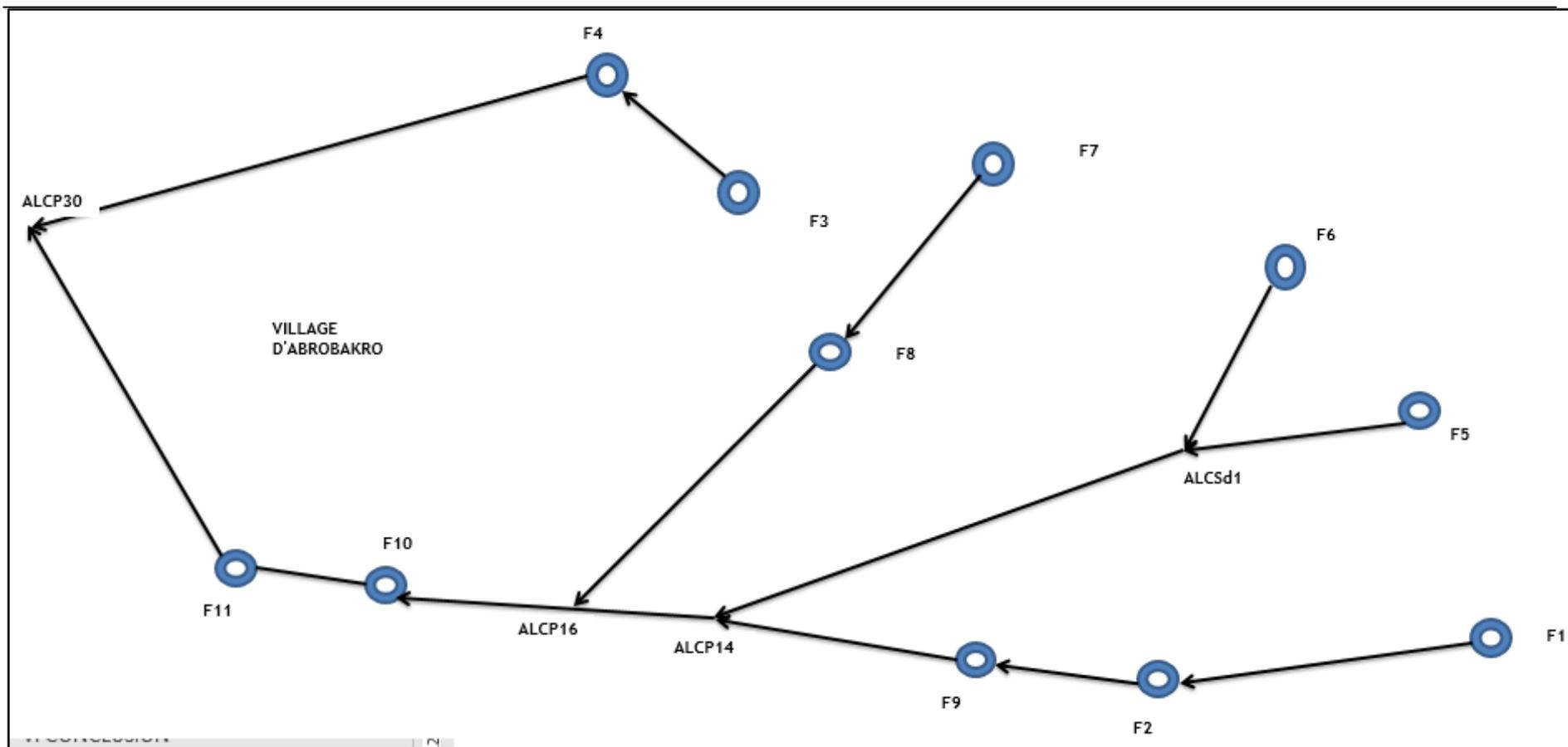
**Annexe 7 : Suivi des évènements dans le réseau à la fermeture de vanne**

<b>Temps(s)</b>	<b>Elément</b>	<b>Messages</b>
<b>197,4</b>	Soupape SPB1	Ouverture
<b>211,1</b>	Soupape SSS1	Ouverture
<b>238,375</b>	Soupape SSS1	Fermeture
<b>243,025</b>	Soupape SPB1	Fermeture
<b>261,025</b>	Soupape SSS1	Ouverture
<b>287,175</b>	Soupape SSS1	Fermeture

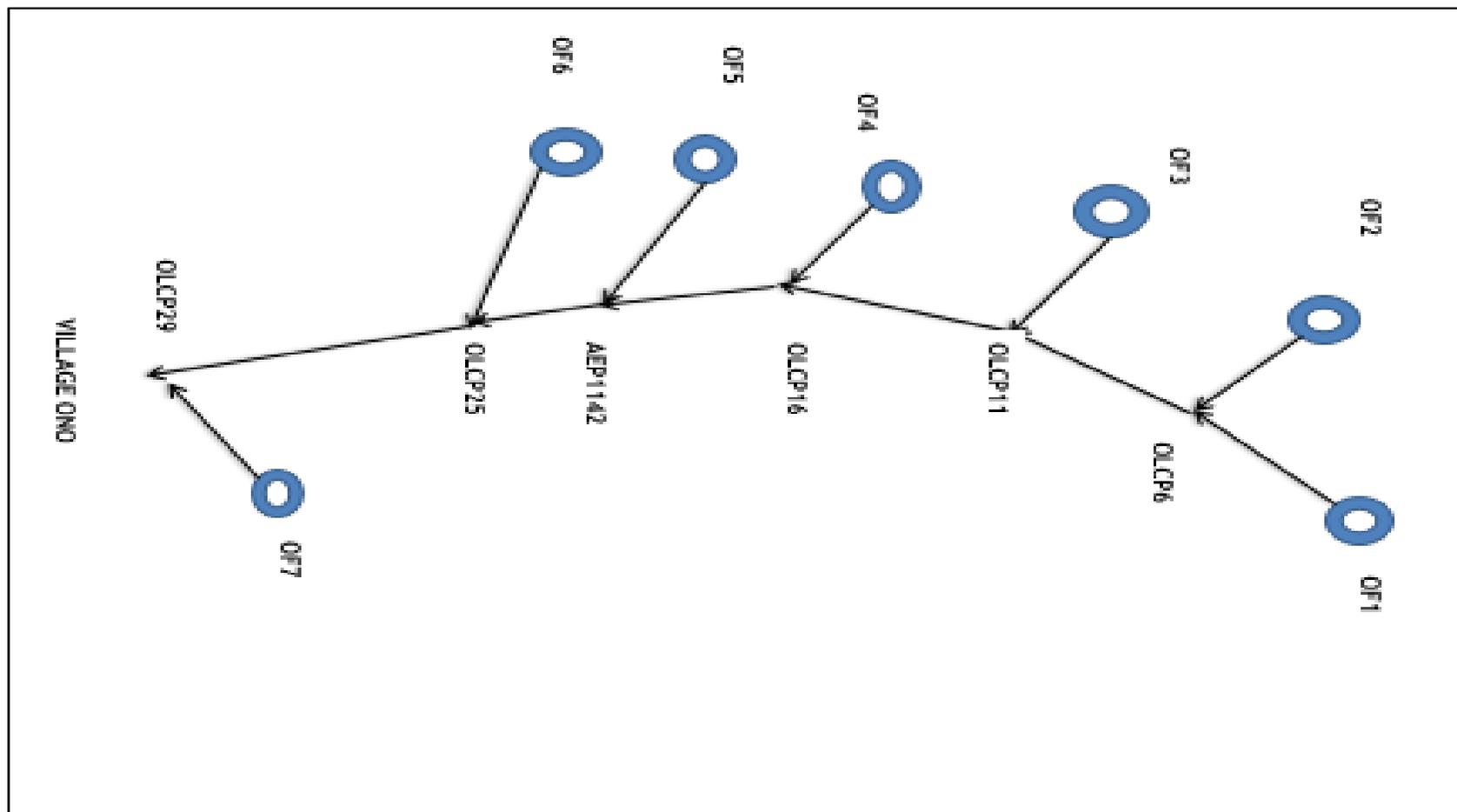
**Annexe 8 : Suivi des évènements dans le réseau au démarrage de la pompe sans ballon anti-bélier**

<b>Temps(s)</b>	<b>Elément</b>	<b>Messages</b>
11,725	Conduite B47->B56	La pression est inférieure à la limite admissible
11,725	Ventouse-modèle par alpha B56	Ouverture
11,725	Conduite B56->B58	La pression est inférieure à la limite admissible
15,15	Conduite B1->B8	La pression est inférieure à la limite admissible
15,375	Conduite B1->B8	Fin de pression trop faible.
18,825	Conduite B47->B56	Fin de pression trop faible.
18,825	Ventouse-modèle par alpha B56	Inversion du débit (admission -> évacuation)
18,825	Conduite B56->B58	Fin de pression trop faible.
21,225	Ventouse-modèle par alpha B56	Fermeture
61,7	Conduite M329->M346	La pression est inférieure à la limite admissible
61,75	Conduite M322->M329	La pression est inférieure à la limite admissible
61,75	Ventouse-modèle par alpha M329	Ouverture
62,175	Conduite M322->M329	Fin de pression trop faible.
62,175	Ventouse-modèle par alpha M329	Inversion du débit (admission -> évacuation)
62,175	Conduite M329->M346	Fin de pression trop faible.
62,4	Conduite M318->M322	La pression est inférieure à la limite admissible
62,45	Conduite M313->M318	La pression est inférieure à la limite admissible
62,45	Ventouse-modèle par alpha M318	Ouverture
62,475	Ventouse-modèle par alpha M329	Fermeture
63,15	Conduite M313->M318	Fin de pression trop faible.
63,15	Ventouse-modèle par alpha M318	Inversion du débit (admission -> évacuation)
63,15	Conduite M318->M322	Fin de pression trop faible.
63,3	Ventouse-modèle par alpha M318	Fermeture
63,45	Conduite M318->M322	La pression est inférieure à la limite admissible
63,55	Conduite M318->M322	Fin de pression trop faible.

### Annexe 9 : Champs captant d'ABROBAKRO

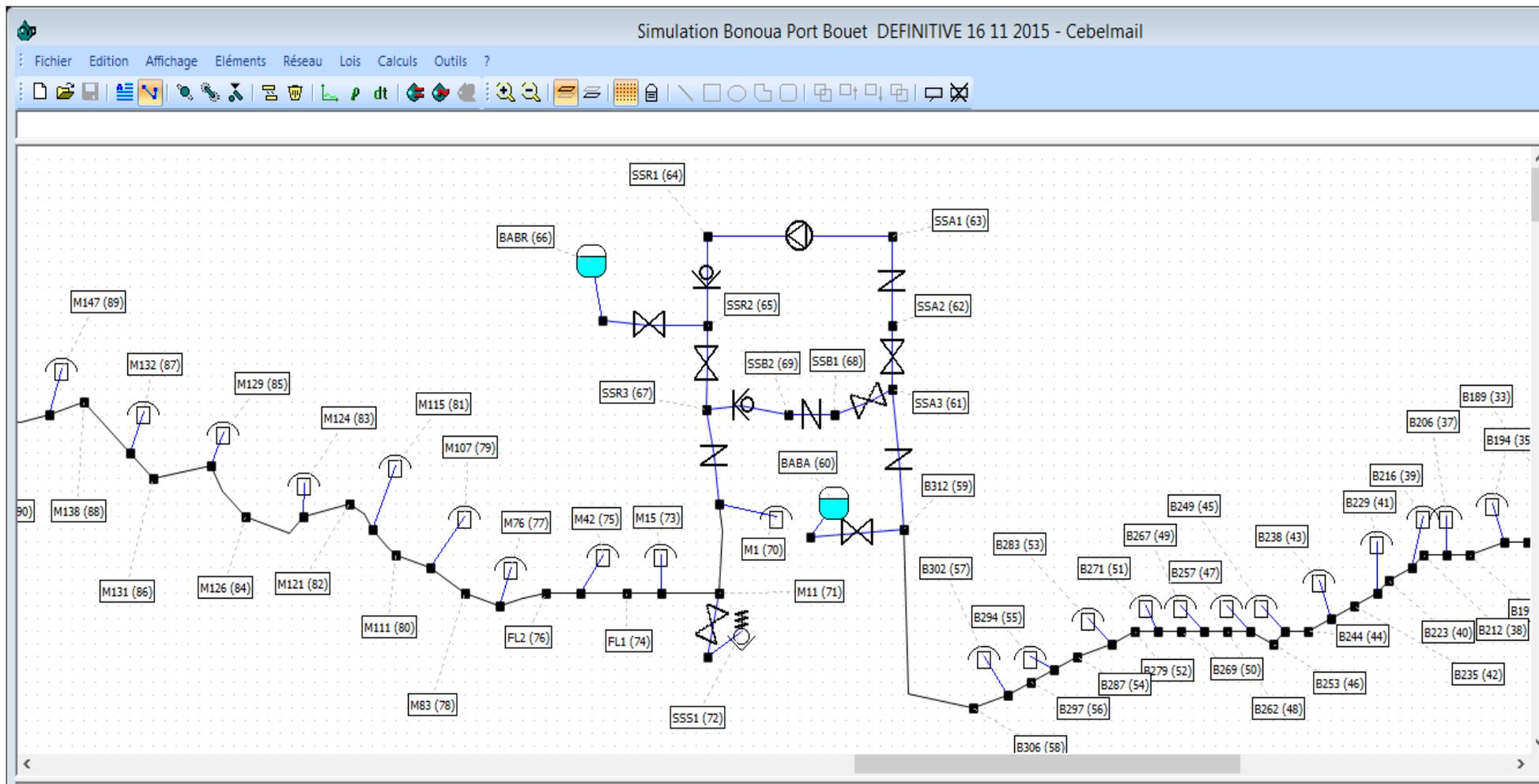


### Annexe 10 : Champs captant d'ONO

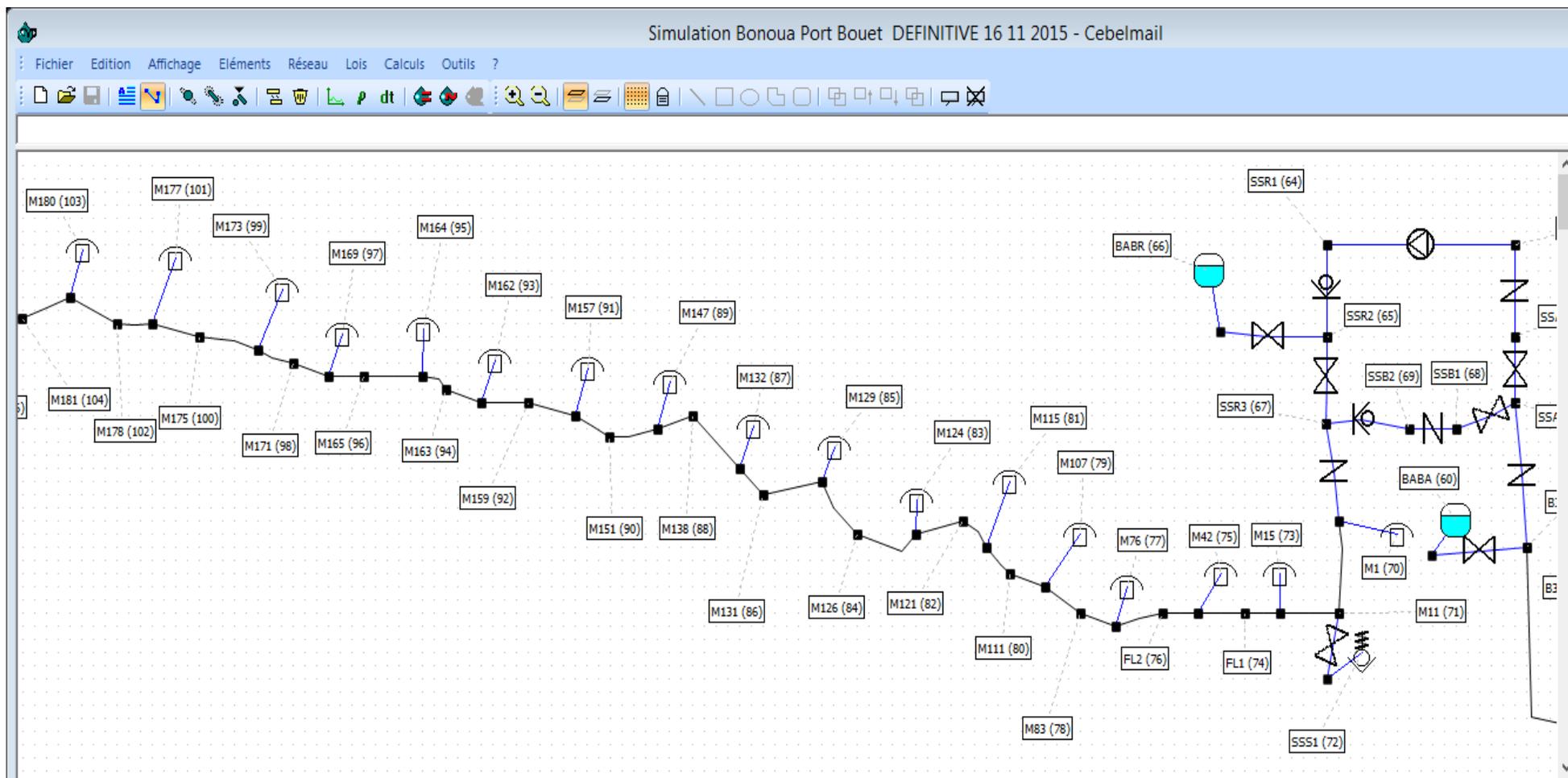




## 9.2. Station de surpression de Moossou



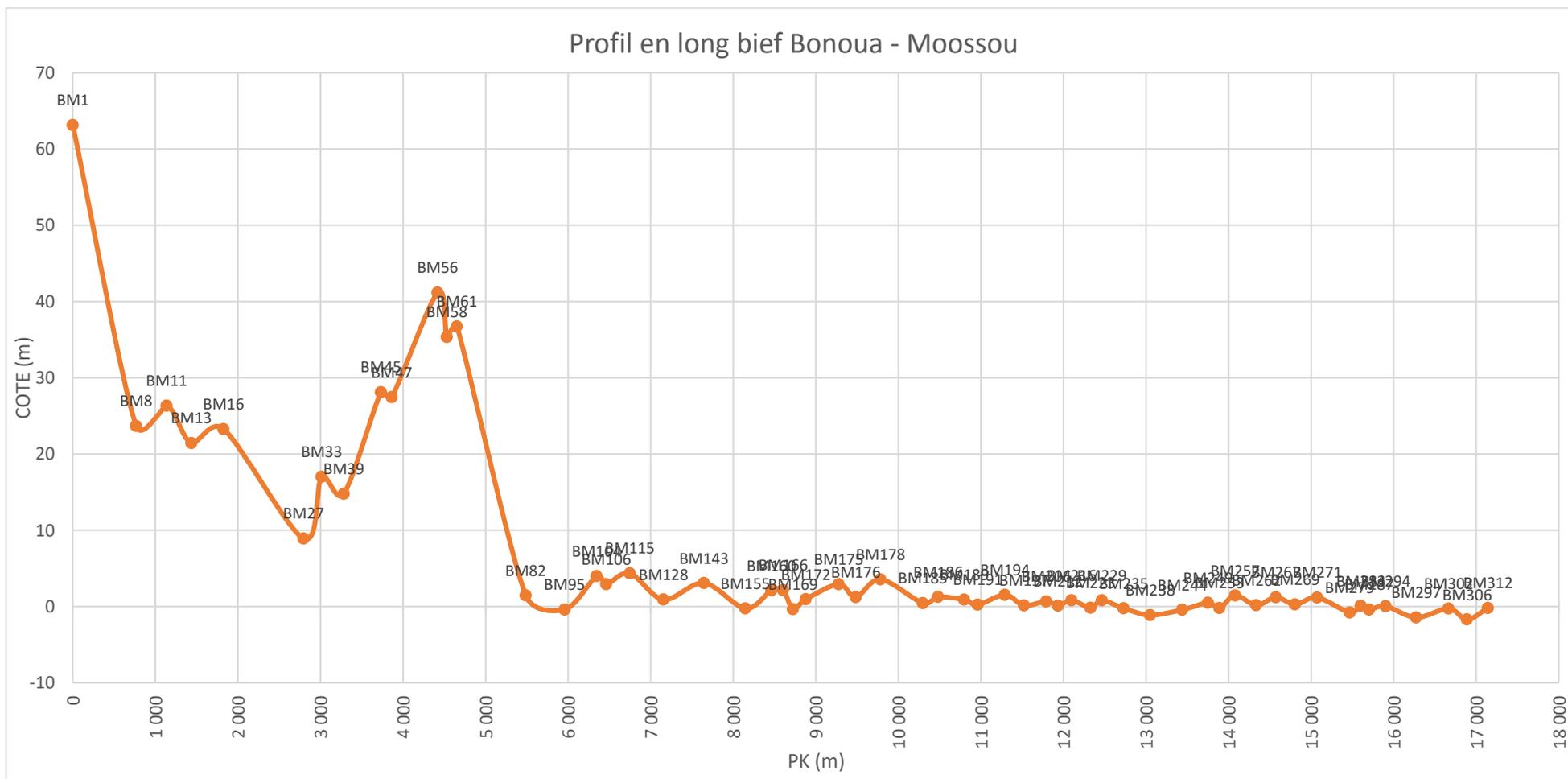
### 9.3. Bief Moossou – Port Bouet



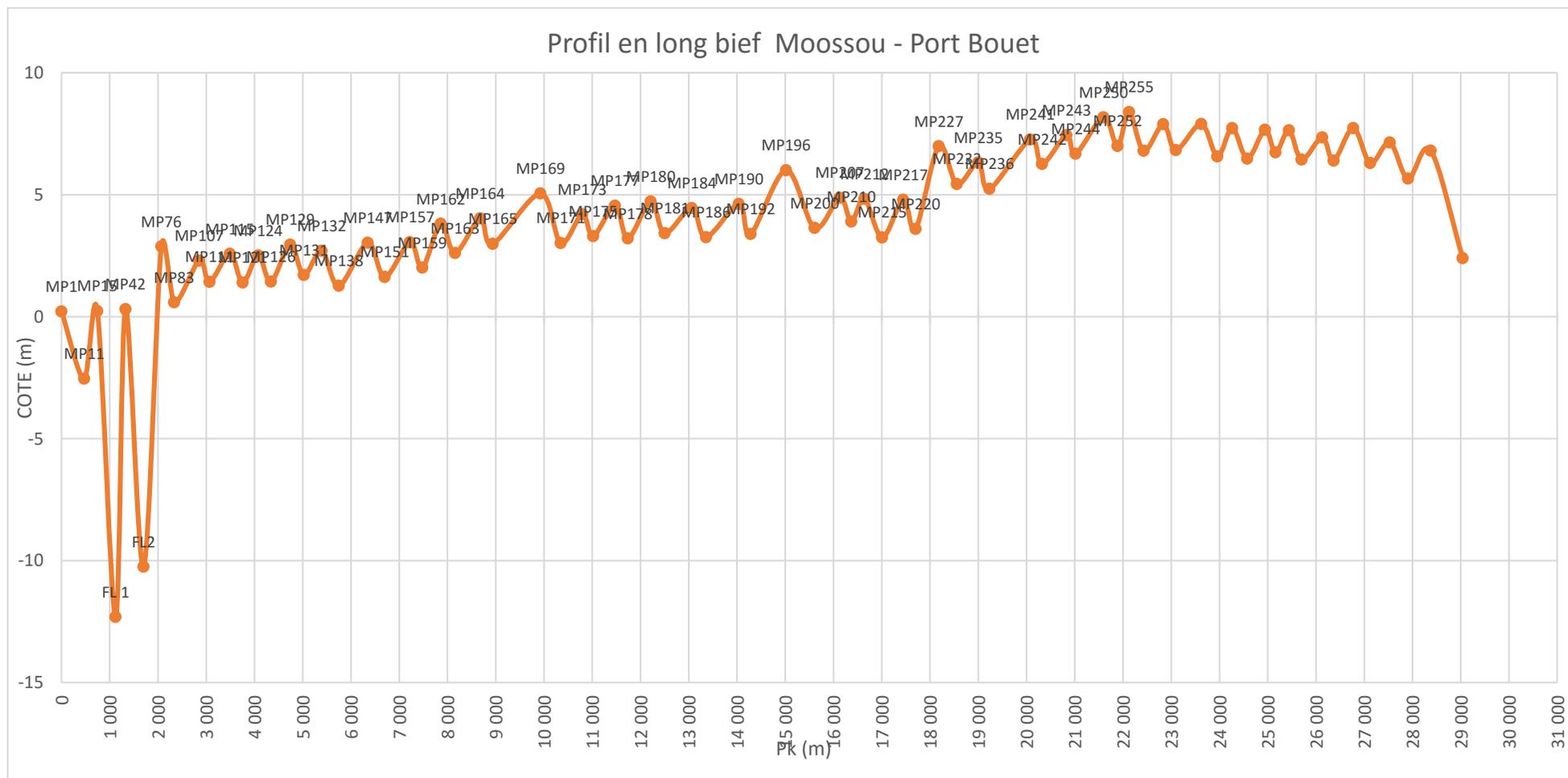


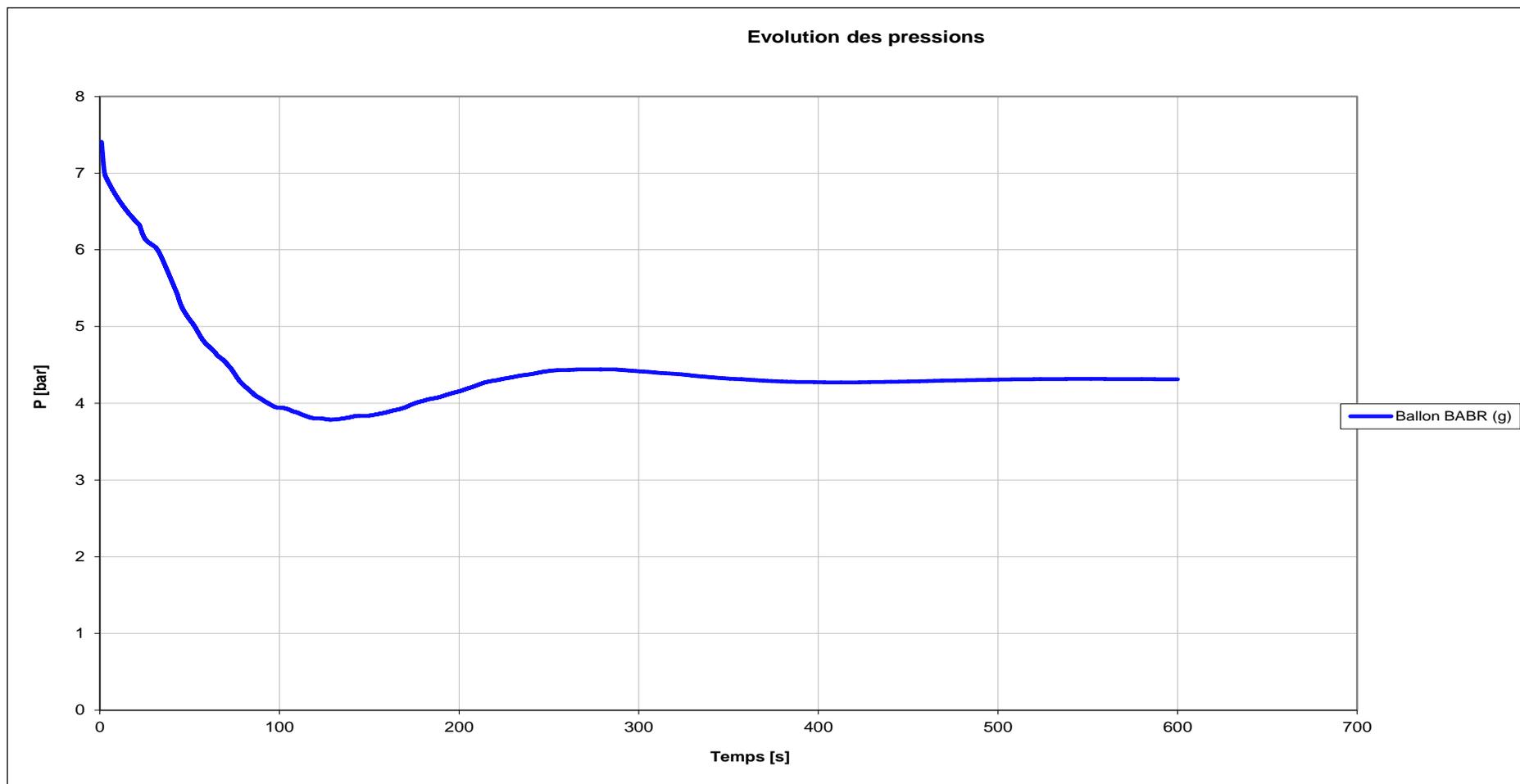
## Annexe 12 : Profil en long du réseau

### 10.1. Bief Bonoua – Moossou

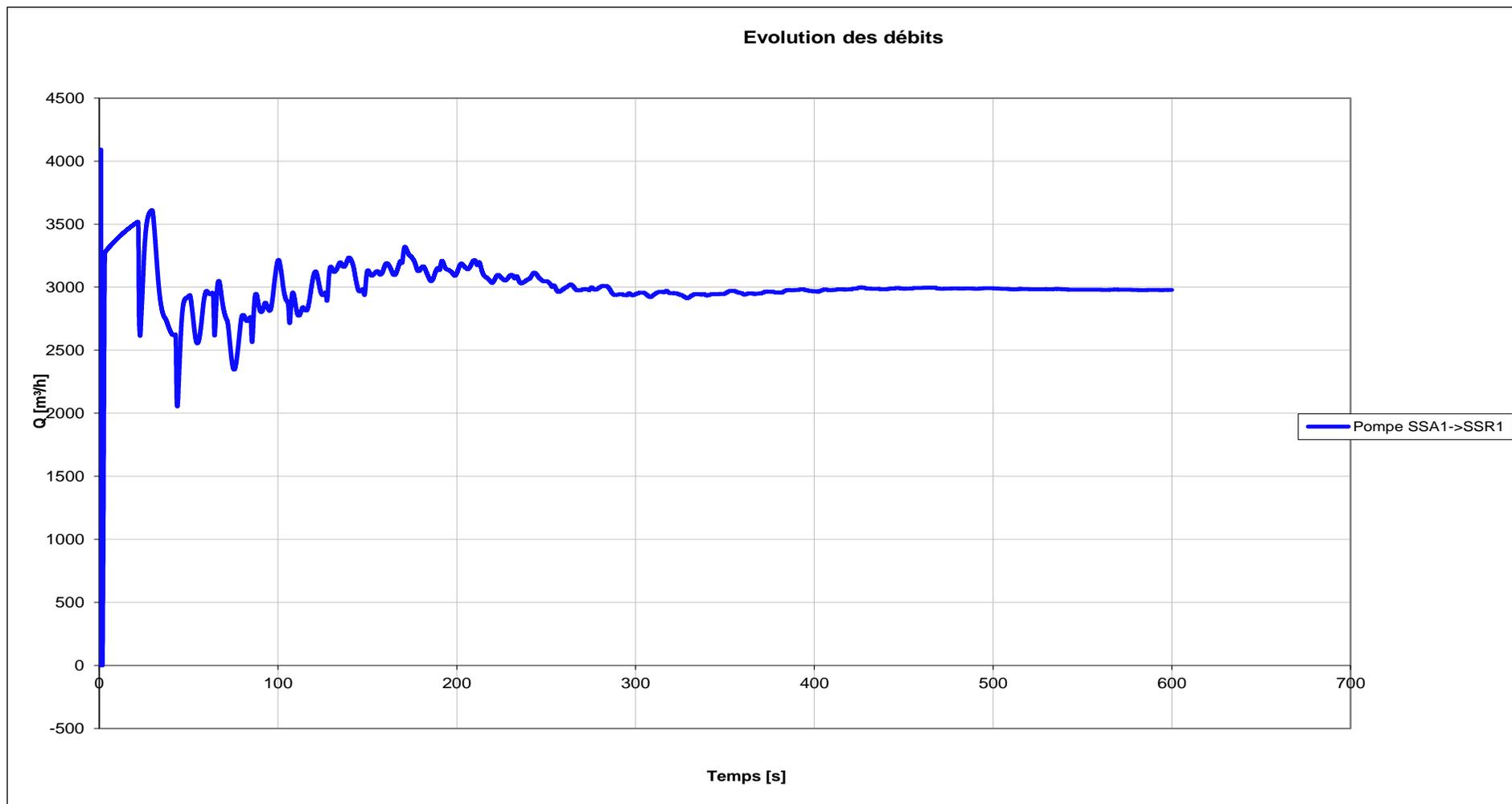


## 10.2. Bief Moossou – Port Bouet

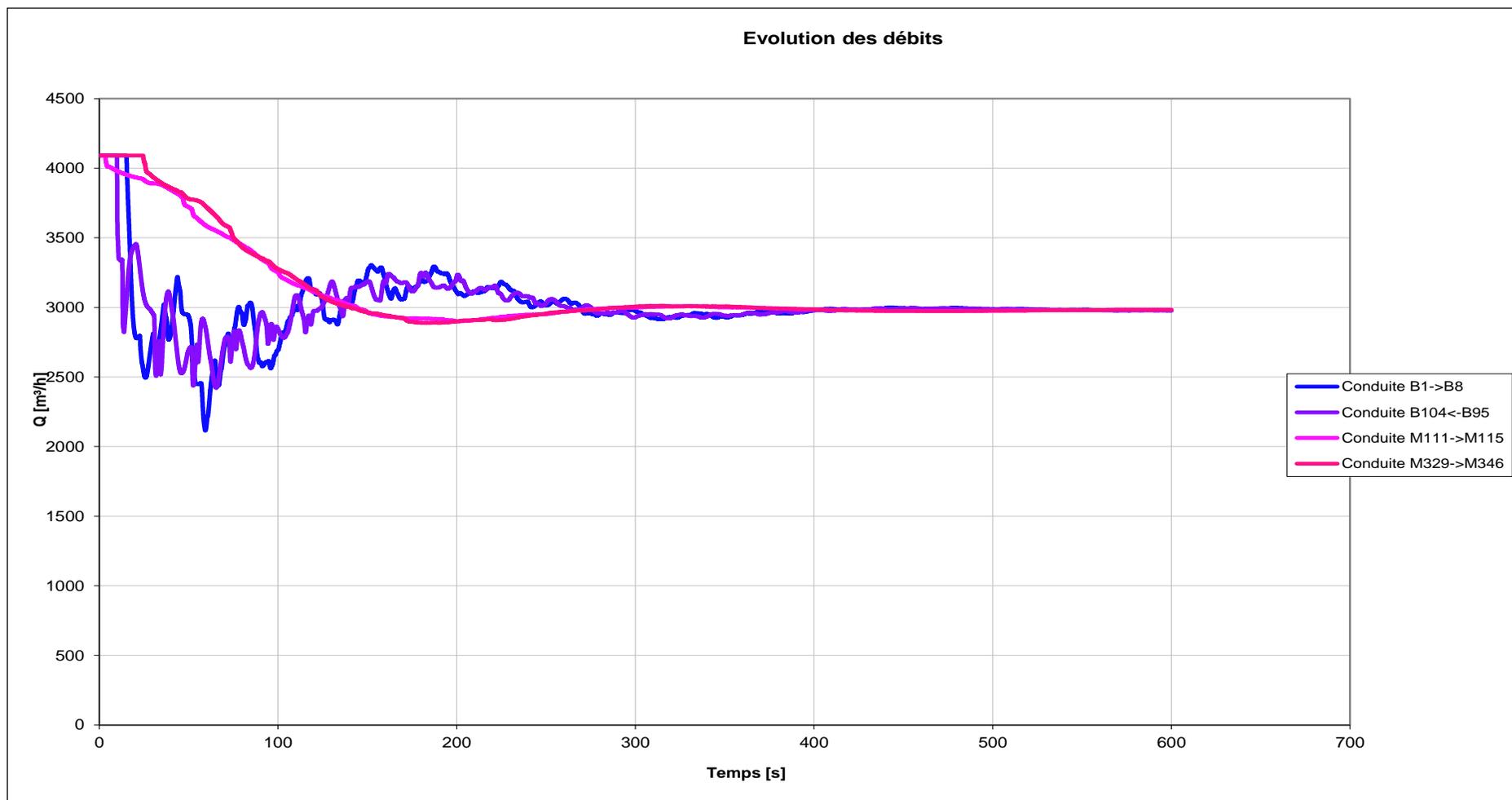


**Annexe 13 : Evolution des pressions dans le Ballon BABR à la disjonction de la pompe**

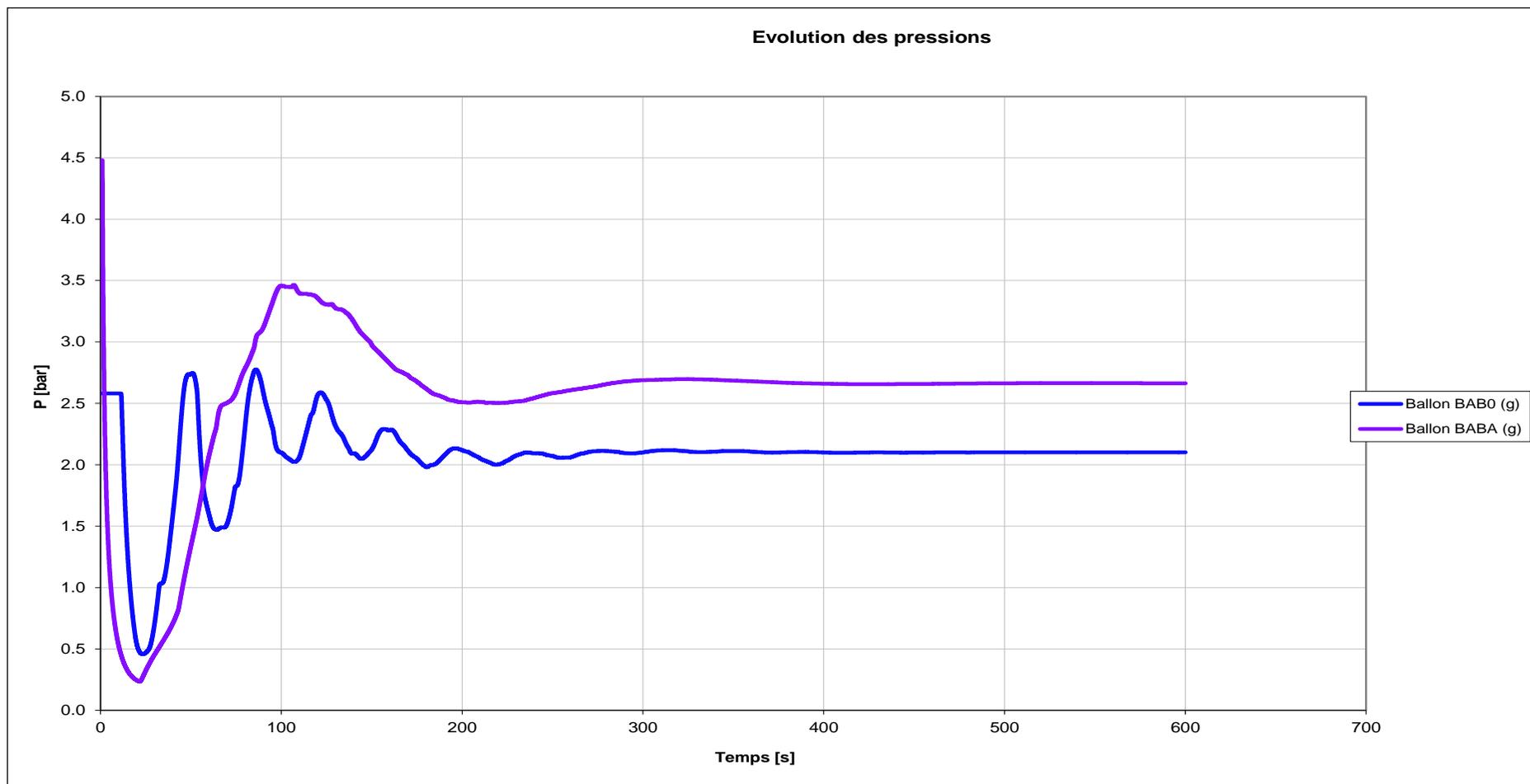
### Annexe 14 : Evolution des débits dans la pompe à la disjonction



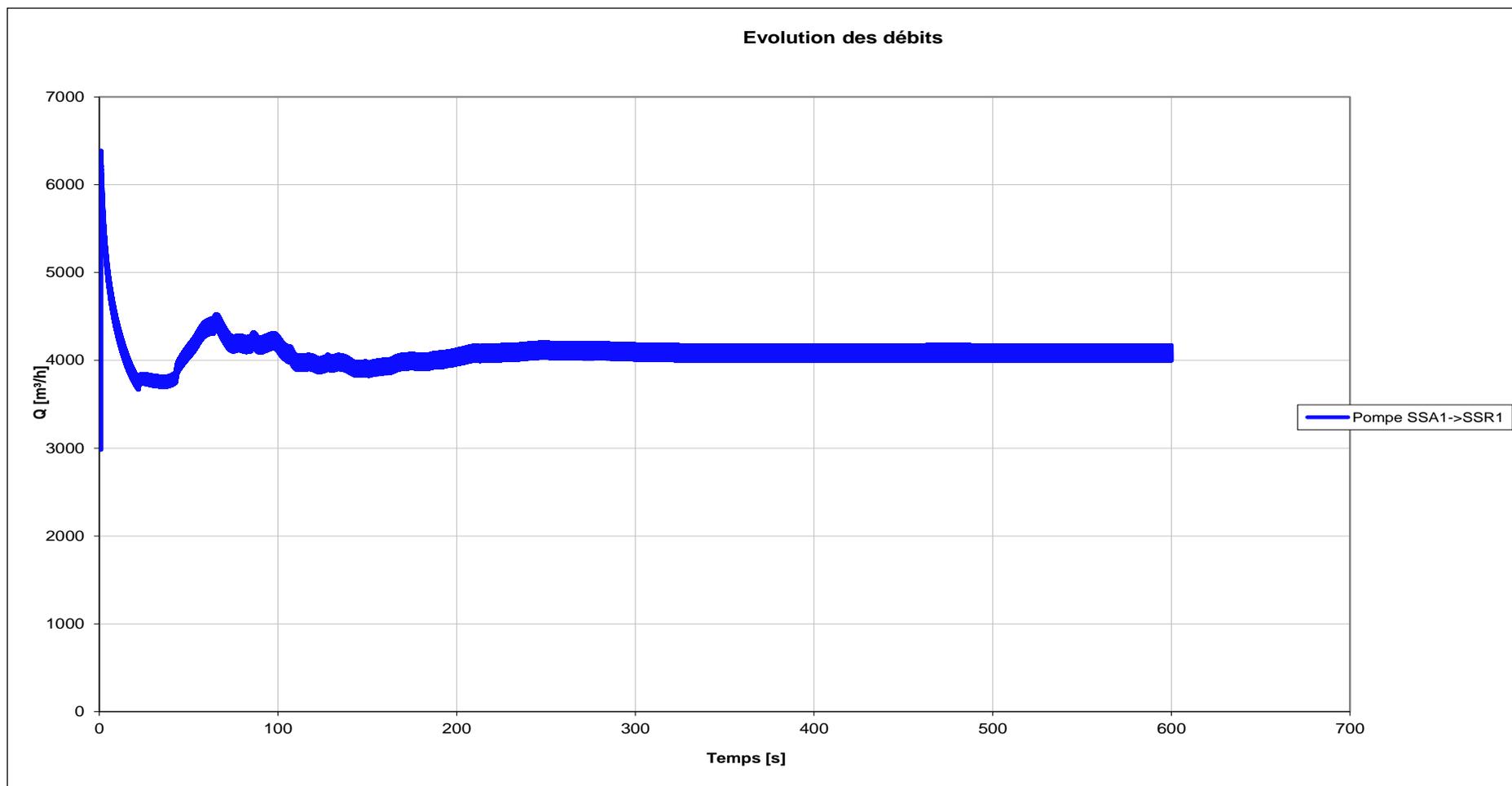
### Annexe 15 : Evolution des débits dans les conduites à la disjonction de la pompe



### Annexe 16 : Evolution des pressions dans les Ballon au démarrage de la pompe



### Annexe 17 : Evolution des débits de la pompe au démarrage



**Annexe 18 : Evolution des débits dans les soupapes à la fermeture de la vanne**

