



HAL
open science

Optimisation de la durée de vie des groupes motopompes de forages

Pauline Mailland

► **To cite this version:**

Pauline Mailland. Optimisation de la durée de vie des groupes motopompes de forages. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2019. dumas-03550772

HAL Id: dumas-03550772

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03550772>

Submitted on 1 Feb 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Optimisation de la durée de vie des groupes motopompes de forages

Étude de cas à la Société des Eaux de l'Est à CREUTZWALD (Moselle)



Pauline MAILLAND
Promotion Grand Lyon 2016-2019
Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme d'ingénieur de l'École Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg (ENGEES)
Formation par apprentissage
Spécialisation en hydrosystèmes souterrains
Octobre 2019

Couverture : Photographies de la crépine d'aspiration de la motopompe du forage 231 avant (à gauche) et après (à droite) son nettoyage le 24 avril 2019.

Crédits photographiques : photographie avant le nettoyage : Mathieu BOSSÉ (Sondalp Well Services), photographie après le nettoyage : Pauline MAILLAND (SUEZ Eau France).

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes que j'ai pu rencontrer durant mes trois années d'apprentissage au sein de SUEZ Eau France à Épinal et au sein de la Société des Eaux de l'Est à Creutzwald.

Merci à mes maîtres d'apprentissages et encadrants : Estelle GRIVEL, Régine CHARTON, Francis CLAUDEL, Jean-Baptiste CLÉMENT, Florian FABACHER et Jean-Luc FICKINGER ainsi qu'à mon tuteur école Jean-Martin MERCKLÉ.

Pour ce travail de fin d'études je tiens à remercier plusieurs collaborateurs : Robert VELT (exploitant à la SEE), Pierre AUBERTIN (acheteur pour la région Grand Est), Nicolas SOUTIF, Mickaël BENOIT, Vincent PONS et Claude TINANT : acheteurs, commerciaux et exploitants du groupe SUEZ Eau France, Thomas HUMBERTCLAUDE et Mathieu BOSSÉ de la filiale Sondalp, Marine SAN JOSÉ MARTIN, Cédric HELMER et Pierre PIERONNE, experts techniques. Je dédie un grand merci tout particulier à Maurice MARTAUD, expert technique en pompage, pour son aide qui fut précieuse.

Merci à Aquassistance pour l'organisation de sa formation sur les ressources en eau et aux formateurs qui ont su partager leur passion : Jean-Marie BATTAREL et Thierry GAILLARD.

Merci à mes collègues mosellans : Céline MANGIONE, Olivier PAGÈS, Frédéric VILMEN, Julien WANGON, Gilbert CALBA, Fabien SCHNEIDER, François VINCI, Cyrille HEIN, Olivier SCHMITT, Jacques SCHERER, Adrien BAMBO MANGIONE, Emeline PUPOVAC et Alexandre ROLL.

Je remercie aussi les professionnels qui ont pris le temps de répondre à un message ou à un appel lors de mes recherches : Karine DESCHAMP, Corinne BRIERE et Denis VEDEL du Syndicat National des Entrepreneurs, Concepteurs et Réalisateurs de Stations de Pompage (SNECOREP), Julien CHALET de Profluid (l'association française des fabricants de pompes et agitateurs, des compresseurs et de la robinetterie), Lucien DELORME de l'association Hydraulique Sans Frontières, Bernard LEROY de l'entreprise hdo et Ronald PIERS de la Commission Européenne.

Merci aux fabricants de motopompes qui ont contribué à la présente étude.

Merci aux enseignants et à la Direction des études de l'ENGEES de façon générale. Merci à François-Joseph DANIEL et François DESTANDAU pour le temps qu'ils ont consacré à répondre à mes questions sur les statistiques. Merci à Thierry SCHAETZLÉ pour ses conseils sur la bibliographie.

Enfin, merci à la famille et aux amis !

Résumé

Optimisation de la durée de vie des groupes motopompes de forages

La Société des Eaux de l'Est (SEE) possède 65 forages qui lui permettent d'alimenter en eau brute et potable des entreprises présentes sur la plateforme industrielle de Carling (en Moselle). L'eau est prélevée grâce à des groupes de pompage immergés. Ces équipements vieillissent parfois rapidement. L'usure peut conduire à un défaut électrique qui empêche la motopompe de redémarrer, alors elle doit être remplacée. La SEE s'est demandée comment optimiser la durée de vie des motopompes tout en maîtrisant les coûts.

La présente étude a débuté avec des recherches bibliographiques et des entretiens auprès de professionnels afin de mieux comprendre le vieillissement des pompes. Alors, il a été possible d'identifier les causes de vieillissement des pompes de la SEE grâce à un état des lieux du patrimoine et à une analyse statistique sur un historique de 10 ans de données.

L'étude a montré que la qualité de l'eau, le choix de la pompe, et la façon dont elle est exploitée ont une influence sur sa durée de vie. Parallèlement, certaines bonnes pratiques conseillées dans la littérature n'ont pas eu d'impact significatif sur la durée de vie des pompes étudiées.

Finalement, des pistes d'amélioration sur les conditions d'exploitation ont été proposées et un outil d'aide à la décision existant pour le choix des pompes à leur achat a été complété. Il permet désormais de prendre en compte les retours d'expérience de la SEE pour estimer la durée de vie des motopompes proposées par les fabricants en fonction des matériaux de conception et des forages dans lesquels elles seront installées. Le coût global et l'amortissement seront calculés de façon plus fidèle à la réalité.

Mots-clés : analyse statistique, coût global, défaut d'isolement, forages, motopompes immergées, qualité d'eau, vieillissement.

Abstract

Optimization of submersible borehole pumps lifetime

The company Société des Eaux de l'Est (SEE) owns 65 boreholes to supply water to industrials on Carling platform (Moselle, France). Water is withdrawn thanks to submersible multistage pumps. The pumps can get worn rapidly. The wear can trigger an electrical malfunction which stops the pump from starting again, so the device has to be replaced. SEE would like to know how to optimize pump lifetime and to manage the costs.

This study starts with a synthesis of bibliographic research and interviews from professionals concerning pump deterioration. Then, a diagnosis of the devices and a statistical analysis on a ten years long dataset allowed to identify the causes of pump aging.

The study has shown that water quality, pump design and operational conditions have an impact on pump lifetime. However, some good practices recommended do not have influence on pump lifetime for those operated at SEE.

The existing decision tool for targeting optimal pump at purchase was completed to take in account SEE's feedbacks. It estimates pump lifetime depending on the borehole they will be installed in and on pump design and manufacturer. Then, the global cost and amortization period calculated are closer to the reality.

Key words: ageing, borehole, electrical malfunction, global cost, statistical analysis, submersible multistage pump, water quality.

Sommaire

Liste des sigles et symboles	9
Liste des figures	10
Liste des tableaux	11
Liste des équations	11
Introduction	13
1 Vieillessement des pompes de forages	15
1.1 Pompage	15
1.1.1 Contexte du pompage d'eau souterraine	15
1.1.2 Pompes	16
1.1.3 Constitution et fonctionnement des motopompes immergées	18
1.2 Phénomènes influençant le vieillissement des motopompes de forages	22
1.2.1 Notions de durée de vie et de vieillissement	22
1.2.2 Usure des pièces	24
1.2.3 Défaits électriques	32
2 État des lieux du patrimoine de la SEE	37
2.1 Rappel du contexte	37
2.1.1 Aperçu de l'état des pompes de la SEE	37
2.1.2 Constats de l'étude de 2008	38
2.2 Observation de l'historique des pompes de 2007 à 2019	39
2.2.1 Informations recueillies	39
2.2.2 Analyse des informations	39
2.3 État des lieux sur le parc de forages	41
2.3.1 Informations recueillies	41
2.3.2 Analyse des informations	42
3 Identification des causes de vieillissement des motopompes de la SEE	45
3.1 Méthode employée pour l'étude	45
3.1.1 Protocole global	45
3.1.2 Données récoltées	45
3.1.3 Méthode d'analyse des données	47
3.2 Résultats de l'analyse statistique des causes de vieillissement des groupes immergés	48
3.2.1 Synthèse des statistiques menées sur les motopompes	48
3.2.2 Synthèse des statistiques menées sur les forages	54
4 Optimisation de la durée de vie des groupes motopompes	59
4.1 Axes pour optimiser la durée de vie des pompes de forages	59
4.1.1 Identification des facteurs sur lesquels il est possible d'agir	59
4.1.2 Pistes d'améliorations pour les conditions d'exploitation	59
4.1.3 Pistes d'amélioration pour le choix des motopompes	61
4.2 Outil d'aide à la décision	64
4.2.1 Principe de l'outil d'aide à la décision attendu	64

4.2.2	Méthode d'estimation de la durée de vie des motopompes et de l'amortissement _____	64
4.2.3	Avantages de l'outil personnalisé pour la SEE _____	66
4.2.4	Étude de fiabilité du modèle _____	66
Conclusion _____		67
Bibliographie _____		69
Annexes _____		71

Liste des sigles et symboles

Sigle	Signification
°f	Degré français
µS/cm	Micro-siemens par centimètre
ACP	Analyse en Composantes Principales
AERM	Agence de l'Eau Rhin Meuse
AFNOR	Association Française de Normalisation
ANOVA	Analyse de la Variance
API	American Petroleum Institute (Institut Américain du pétrole)
ASM	American Society for Metals (Société Américaine des métaux)
ASTEE	Association Scientifique et Technique pour l'Eau et l'Environnement
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
BSR	Bactéries sulfato-réductrices
BTR	Bactéries thiosulfato-réductrices
CAH	Classification ascendante hiérarchique
CAR ou CARB	Carbone
CEI	Commission Électrotechnique Internationale
CER	Céramique
ENGEES	École Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg
EPS	Exopolymères extracellulaires
GTi	Grès du Trias inférieur
HBL	Houillères du Bassin de Lorraine
HMT	Hauteur manométrique totale
INERIS	Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques
MOMO	Micro-organismes mangano-oxydants
Ni	Nickel
NBR	Caoutchouc Nitrile, Copolymères Butadiène-acrylonitrile
NPSH	Net Positive Suction Head (hauteur d'aspiration positive nette)
PE	Polyéthylène
pH	Potentiel Hydrogène
PVC	Polychlorure de vinyle
RAS	Rien à signaler
SCE	Somme du Carré des Écarts
SEE	Société des Eaux de l'Est
SiC/SiC	Carbure de Silicium
SNECOREP	Syndicat National des Entrepreneurs, Concepteurs et Réalisateurs de Stations de Pompes
TAC	Titre Alcalimétrique Complet
TH	Titre Hydrotimétrique
V	Volt
ZSM	Zeolite Socony Mobil (Zéolite)

Liste des figures

Figure 1 : Localisation de la plateforme industrielle de Carling (source : La Croix, 2009 ¹)	13
Figure 2 : Coupe technique schématisée d'un forage (adapté de l'ADEME, BRGM)	15
Figure 3 : Constitution d'une pompe rotodynamique (ASTEE, 2006)	16
Figure 4 : Constitution d'un groupe motopompe immergé (illustration adaptée de Flowserve)	18
Figure 5 : Vue éclatée d'une garniture mécanique (ASTEE, 2005)	20
Figure 6 : Altitudes importantes à connaître pour le dimensionnement d'une pompe (adaptée de l'ASTEE, 2005)	20
Figure 7 : Schéma des principales causes de vieillissement et de fin de vie des groupes motopompes	23
Figure 8 : Schéma des étapes de la corrosion, réaction électrochimique	25
Figure 9 : Massif filtrant engagé dans les crépines du forage (Rapport d'inspection télévisée du forage 205b, Gewatec, 2014)	29
Figure 10 : Massif filtrant évacué par air-lift du forage 234 (Gewatec, 2014)	29
Figure 11 : Position idéale de la pompe dans le forage (SNECOREP, 2010)	34
Figure 12 : Photographies du groupe motopompe du forage 204 de la SEE sortie en mars 2019	37
Figure 13 : Causes d'interventions annuelles sur les forages de la SEE entre 1991 et 2007 (archive SEE)	38
Figure 14 : Répartition par tranches d'heures de la durée de vie de fonctionnement des groupes motopompes avant leur dépose	40
Figure 15 : Répartition des causes de dépose des 185 groupes motopompes étudiés	40
Figure 16 : Durée de vie moyenne des groupes motopompes en fonction de la cause de leur dépose	41
Figure 17 : Statistiques sur les forages - données qualitatives	43
Figure 18 : Schéma de la méthode d'exploitation et d'interprétation des données	48
Figure 19 : Visualisation des classes de motopompes sur le plan factoriel	50
Figure 20 : Exemple de comparaison des effectifs réels et théoriques pour le test du Khi^2 sur le constructeur de la pompe	52
Figure 21 : Visualisation des forages sur le plan factoriel	55

Liste des tableaux

Tableau 1 : Illustration de différents types de pompes (SNECOREP, 2010)	17
Tableau 2 : Statistiques sur la durée de fonctionnement des pompes et la durée de présence dans le forage.....	39
Tableau 3 : Statistiques sur les forages - données quantitatives.....	42
Tableau 4 : Choix des paramètres conservés pour la CAH.....	49
Tableau 5 : Synthèse des résultats obtenus pour les motopompes avec le test du Khi ²	51
Tableau 6 : Synthèse des résultats obtenus pour les forages avec le test du Khi ²	56
Tableau 7 : Tendances des propositions commerciales en fonction des fabricants.....	62
Tableau 8 : Variables prises en compte pour estimer la durée de vie des motopompes	64

Liste des équations

Équation 1 : Dimensionnement de la HMT d'une motopompe.....	21
Équation 2 : Rendement global du groupe de pompage.....	21
Équation 3 : Calcul du score global de qualité	46
Équation 4 : Calcul du score global de l'état du forage	47
Équation 5 : Détermination de la durée de vie moyenne des motopompes	65
Équation 6 : Calcul de la durée d'amortissement.....	65
Équation 7 : Calcul de la durée de fonctionnement journalière.....	65
Équation 8 : Calcul de du coût global	65
Équation 9 : Calcul de l'amortissement	65

Introduction

La Lorraine est connue pour son passé minier, notamment avec les Houillères du Bassin de Lorraine (HBL). En 1989, dans le contexte de leur fin d'activité, les HBL cèdent leur réseau d'eau situé dans la zone de Carling à la Société des Eaux de l'Est.

La Société des Eaux de l'Est (SEE) est une société anonyme située à Creutzwald, près de Carling, en Moselle (Figure 1). Créée en 1989, ses actionnaires sont SUEZ Eau France (65 %), Total Petrochemicals France, ARKEMA et Gazel Energy Generation (Centrale Émile Huchet).

La SEE distribue d'une part de l'eau brute aux industriels de la plateforme de Carling qui sert aux process et au refroidissement des installations et d'autre part, de l'eau potable pour les bâtiments de ce secteur. Les consommations industrielles s'élevaient à 15 000 000 m³ d'eau brute en moyenne annuelle entre 2010 et 2018.

Afin d'assurer ses missions, la SEE détient un patrimoine aujourd'hui composé de :

- 65 forages (dont 3 en eau potable),
- 1 de station de traitement,
- 11 réservoirs,
- 91 km de réseau.

La répartition de ces installations est présentée en Annexe 1.

Les forages sont équipés de motopompes (ensembles constitués d'un moteur et d'une pompe) immergées qui permettent de prélever l'eau dans la nappe des Grès du Trias inférieure (GTi). Ces équipements, une fois en place, sont invisibles. Ils vieillissent et perdent de leur efficacité. Le vieillissement peut amener les motopompes à ne plus fournir un débit suffisant au regard des besoins voire à ne plus être capables de démarrer. Ainsi, les motopompes doivent être changées fréquemment. Ces renouvellements représentent un budget conséquent pour la SEE qui y consacre environ 150 000 € chaque année. La maîtrise du vieillissement des motopompes est donc un enjeu environnemental et économique pour l'exploitant.

Dans une étude commandée en 2018 par la Commission Européenne, la durée de fonctionnement annuelle moyenne des motopompes immergées est de 2 880 h/an et leur durée de vie économique est considérée égale à 10 ans (Van Holsteijn en Kemna BV and Viegand Maagøe A/S, 2018). Cela laisse penser qu'une motopompe devrait être remplacée en moyenne après 28 800 heures de fonctionnement.

À la SEE, entre 2007 et 2019 les pompes de forages ont été remplacées en moyenne tous les 3 ans après 9 700 h de fonctionnement. Ainsi, la comparaison avec les chiffres de la Commission Européenne montre que le vieillissement des pompes de la SEE semble prématuré.



Figure 1 : Localisation de la plateforme industrielle de Carling (source : La Croix, 2009¹)

¹ Image issue du journal La Croix du 16 juillet 2009 [En ligne] [consulté le 10 juillet 2019]. **Explosion chez Total Petrochemicals Carling.**

https://www.la-croix.com/Actualite/France/Explosion-chez-Total-Petrochemicals-Carling-deux-morts-six-blesses-NG_-2009-07-16-537073

En 2008, la SEE s'était interrogée sur les causes du vieillissement des pompes. Une étude avait été lancée en partenariat avec des fabricants de motopompes mais elle n'a pas abouti. La principale conclusion était de considérer les motopompes comme un consommable : un objet jetable.

En 2018, la SEE a souhaité remettre cette étude au goût du jour afin d'envisager des alternatives pour espacer les renouvellements de pompes.

Ce travail de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieure de l'École Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg (ENGEES) a été l'occasion d'explorer ce sujet.

L'objectif de la présente étude est de trouver des solutions pour optimiser la durée de vie des pompes immergées en prenant en compte l'aspect économique et les retours d'expérience. Pour y parvenir, le projet s'est déroulé en quatre phases :

- La compréhension des mécanismes de vieillissement des équipements de pompage à l'aide de recherches bibliographiques et d'entretiens avec des professionnels,
- L'état des lieux des équipements de pompage de la SEE,
- L'analyse statistique sur les pompes et les forages pour identifier les paramètres ayant un impact significatif sur la durée de vie des motopompes,
- L'utilisation des informations recueillies pour proposer des solutions afin d'allonger la durée de vie des pompes et pour alimenter un outil d'aide à la décision concernant leur choix à l'achat.

1 Vieillesissement des pompes de forages

1.1 Pompage

1.1.1 Contexte du pompage d'eau souterraine

Une pompe de forage est une pompe immergée dans un forage ou dans un puits (plus large et moins profond qu'un forage). Ces ouvrages sont creusés dans le sol afin de capter des nappes, contenues dans un aquifère². Comme le montre la Figure 2, un forage est constitué d'un tubage sur toute sa hauteur. Sur la partie supérieure, le tubage est plein et entouré d'une cimentation. Plus bas, le tubage est entouré d'un massif filtrant composé de graviers calibrés. Sur la partie captante, le tubage est crépiné (perforé) afin de laisser s'écouler l'eau de l'aquifère vers le forage.

Une canalisation (colonne d'exhaure) est installée au centre du tubage jusqu'à atteindre un niveau plus bas que le niveau d'eau dans le forage. À l'extrémité basse de cette colonne, une pompe est installée. Ce système de pompage permet de monter l'eau souterraine vers un réseau d'adduction jusqu'au point de livraison.

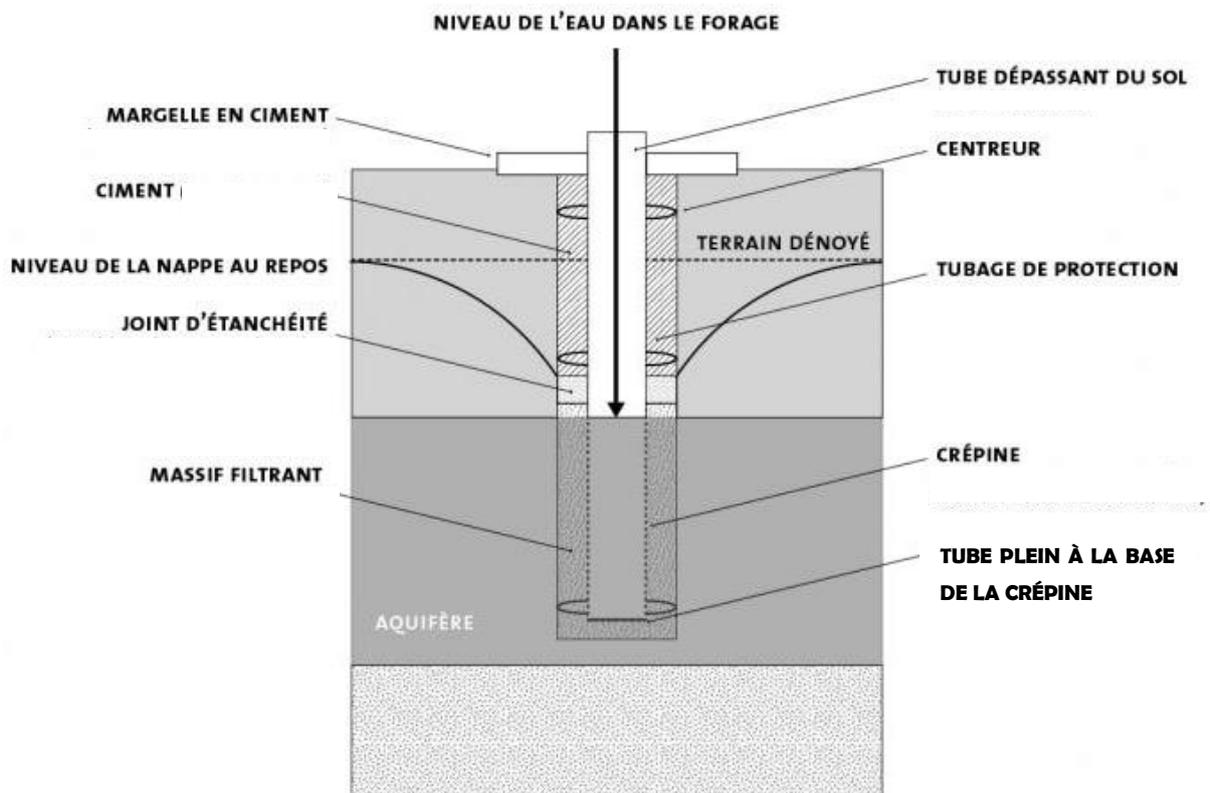


Figure 2 : Coupe technique schématisée d'un forage (adapté de l'ADEME, BRGM)³

² Un aquifère est une couche de roche perméable dont les porosités contiennent de l'eau. Lorsque tous les pores sont remplis d'eau, la zone est dite saturée. La masse d'eau contenue dans l'aquifère est alors nommée nappe (Castany, et al., 1977). L'aquifère est donc le contenant et la nappe le contenu.

³ Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie et Bureau de Recherches Géologiques et Minières. **Échangeur sur aquifère, technologie et fonctionnement [En ligne]** ADEME et BRGM. [consulté le 4 mars 2019]. <http://www.geothermie-perspectives.fr/article/echangeur-aquifere-technologie-fonctionnement>

1.1.2 Pompes

1.1.2.1 Types de pompes

Il existe deux grands types de pompes :

- **Les pompes volumétriques** : dont le volume reste constant même si la hauteur de refoulement varie. Un exemple est la pompe doseuse fréquemment utilisées pour l'injection de javel dans un contexte de désinfection de l'eau.
- **Les pompes rotodynamiques** : couramment utilisées en adduction d'eau, elles fournissent un débit qui évolue dans le sens inverse de l'énergie apportée au fluide par la pompe.

C'est ce second type de pompe qui est étudié dans le présent rapport.

1.1.2.2 Principe général des pompes rotodynamiques

Une pompe rotodynamique donne de l'énergie au fluide mais ne l'accélère pas (Hanocq, 1909). Comme l'illustre la Figure 3, l'eau aspirée est apportée au centre d'une roue. La roue comporte des aubes (ou ailettes) et elle est fixée sur un arbre (ou rotor). Elle est mise en mouvement grâce à un moteur. L'énergie mécanique de la roue est transmise à l'eau sous forme d'énergie cinétique et d'énergie potentielle. La part d'énergie potentielle est augmentée lorsque l'eau est ralentie en étant recueillie dans des éléments nommés diffuseurs. L'énergie fournie par la pompe au fluide est nommée hauteur manométrique totale (notée HMT).

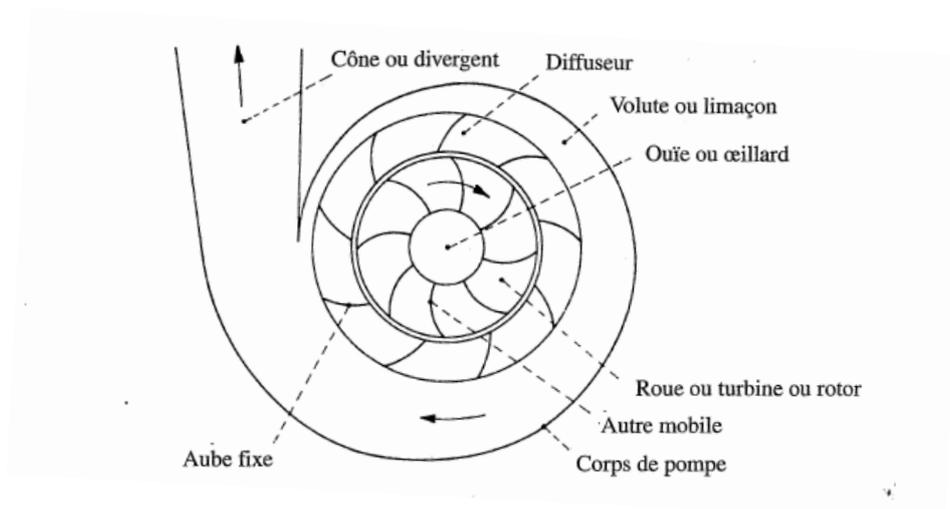


Figure 3 : Constitution d'une pompe rotodynamique (ASTEE, 2006)

Une pompe rotodynamique doit toujours démarrer en eau.

1.1.2.3 Classification des pompes rotodynamiques

Les pompes rotodynamiques ont différentes dénominations selon :

- la forme de la roue (Annexe 2) et la direction du flux par rapport à l'arbre : pompe semi-axiale, pompe radiale (aussi dite centrifuge) ou encore pompe à hélice (si la roue est axiale),
- le nombre de roues : pompe monocellulaire ou multicellulaire,
- le lien entre le moteur et la pompe : pompe monobloc ou à accouplement,
- la configuration choisie par rapport à la profondeur d'utilisation : pompe de surface, pompe à axe vertical ou pompe immergée (Tableau 1).

Tableau 1 : Illustration de différents types de pompes (SNECOREP, 2010)

Pompe de surface monobloc	Pompe verticale à ligne d'arbre	Groupe motopompe immergé
		

Une pompe de surface peut être utilisée si le niveau dynamique de l'eau est à moins de 8 m de profondeur ((OIE, 1996), (Mabillot, 1971)). Au-delà, la pression atmosphérique n'est pas suffisante pour amorcer l'aspiration d'eau par la pompe. Pour des profondeurs plus importantes, deux solutions se présentent :

- Soit la pompe verticale à ligne d'arbre,
- Soit le groupe motopompe immergé.

Les pompes à ligne d'arbre (ou pompe à axe vertical) sont robustes. Le moteur est logé dans un local au sommet du forage. L'arbre de transmission descend dans le forage. Il tourne au milieu de la colonne d'exhaure au bout de laquelle est fixée la partie hydraulique de la pompe. Ce type de pompe nécessite de la maintenance. En effet, les pièces de guidage sont nombreuses et peuvent s'user.

Depuis les années 1920 (Mabillot, 1971), des moteurs sont utilisables sous l'eau. Cela a été rendu possible grâce à l'apparition de matériaux synthétiques isolants (comme le polychlorure de vinyle (PVC)) qui entourent les câbles électriques. Étant peu bruyants, ne nécessitant que de peu de maintenance et pas de local spécifique (un regard suffit), les groupes motopompes immergés sont les systèmes de pompage les plus couramment utilisés dans les forages.

1.1.3 Constitution et fonctionnement des motopompes immergées

1.1.3.1 Conception des motopompes immergées

Une pompe immergée est en fait un groupe motopompe qui baigne dans l'eau d'un forage. Comme le montre la Figure 4, le moteur est situé sous l'aspiration équipée d'une crépine. L'aspiration est elle-même placée sous la partie hydraulique (arbre et roues).

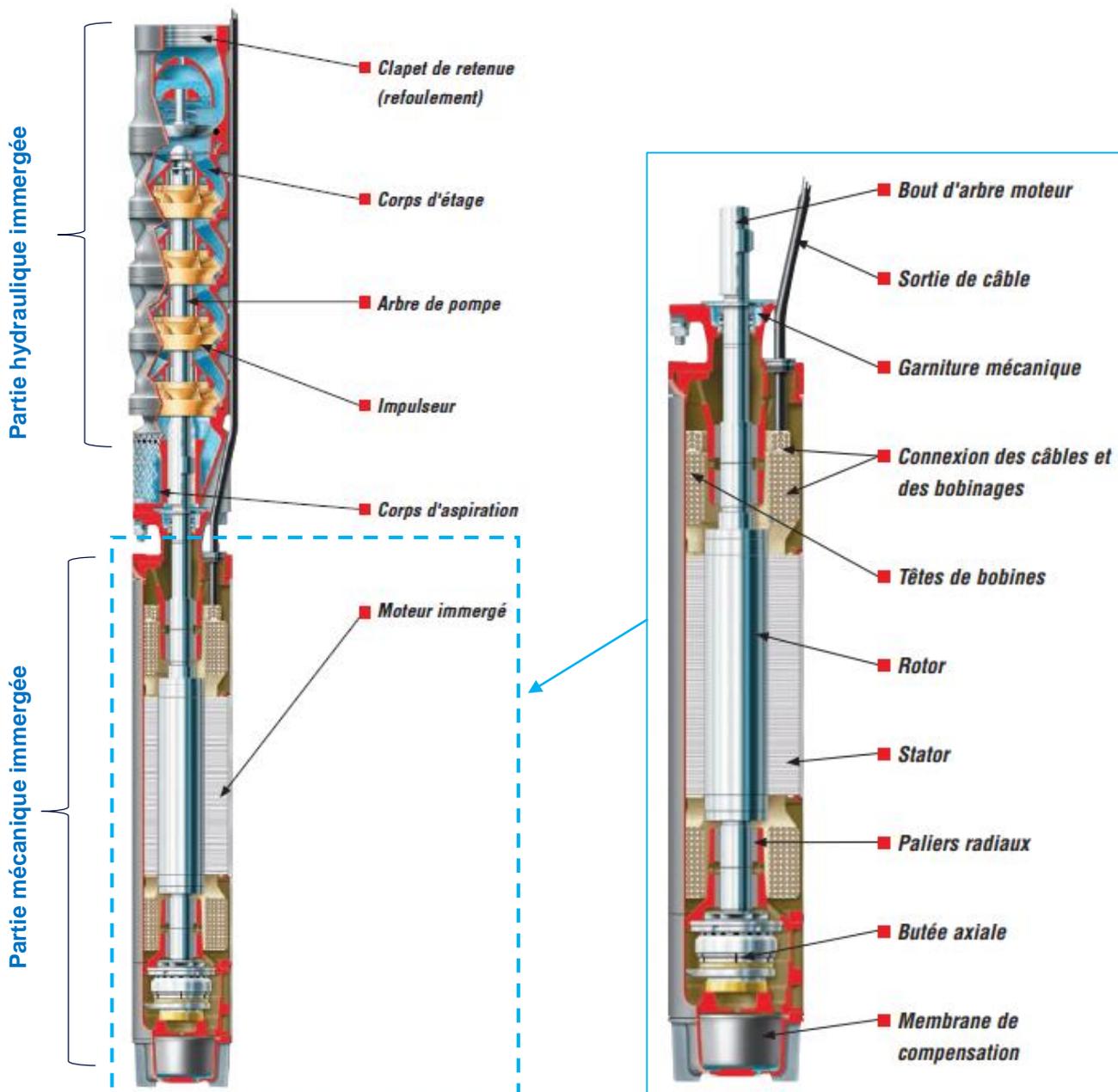


Figure 4 : Constitution d'un groupe motopompe immergé (illustration adaptée de Flowserve)

Les groupes immergés sont généralement multi-étagés (ou multicellulaires). L'association de roues (impulseurs) en série permet d'augmenter la hauteur manométrique totale (HMT) pour un même débit pompé. L'eau aspirée à travers la crépine arrive au milieu de la première roue. Puis elle est propulsée à l'extrémité de la roue, vers le corps d'étage, qui l'oriente vers la prochaine roue et ainsi de suite jusqu'à la sortie (refoulement).

1.1.3.2 Précisions sur le fonctionnement du moteur

Les moteurs électriques des groupes immergés sont alimentés en triphasé. Cela permet d'avoir une tension et une puissance plus importantes que pour les usages domestiques. Ainsi, quatre câbles sont reliés aux appareils : les trois phases et le neutre. Il existe différentes technologies de moteurs. Les moteurs les plus fréquemment utilisés dans les forages sont les moteurs asynchrones.

Le principe général est le suivant : le stator est composé de trois bobines. Chaque bobine est reliée à une phase et disposée autour d'un aimant. Le courant électrique qui les parcourt crée un champ magnétique tournant. Les courants induits sont récupérés par des éléments métalliques du rotor qui est alors mis en mouvement.

1.1.3.3 Précisions sur les pièces de pivoterie et d'étanchéité

1.1.3.3.1 Pièces de pivoterie et d'étanchéité

Les groupes motopompes de forage sont composés d'éléments fixes au sein desquels s'effectue la rotation de l'arbre, et donc des roues. Des éléments clés comme les paliers lisses ou la butée axiale assurent le mouvement et l'intégrité du groupe motopompe. La garniture mécanique assure l'étanchéité.

1.1.3.3.2 Paliers lisses

Les paliers lisses, aussi dits coussinets, sont des pièces fixées à l'intérieur du corps de pompe, d'aspiration ou du moteur, au sein desquelles l'arbre tourne. Ils maintiennent l'arbre dans son axe de rotation. La face du palier lisse exposée à l'arbre est composée d'un polymère ou de bronze (technologie plus ancienne). Ces matériaux sont résistants à l'usure et aux fortes températures causées par les frottements.

1.1.3.3.3 Butée axiale

La roue de la pompe est soumise à une poussée axiale. Cette poussée est le résultat des forces de pression exercées de chaque côté de la roue. La poussée axiale doit être compensée afin d'éviter un déplacement des pièces mobiles reliées à l'arbre. L'organe compensant la poussée axiale est nommé butée axiale. La butée est située au pied de l'arbre dans le moteur (Figure 4).

La butée se compose d'une pièce fixe et d'une pièce mobile. Le mouvement peut créer des frottements, dégageant de la chaleur. La butée axiale est refroidie et lubrifiée par le liquide de refroidissement du moteur (mélange d'eau et de glycol).

1.1.3.3.4 Garniture mécanique

L'arbre de la motopompe immergée est logé dans le rotor du moteur. La garniture mécanique (Figure 4 et Figure 5), placée au sommet du moteur, empêche la venue d'eau du forage vers le moteur.

Elle est composée de deux bagues, l'une fixe et l'autre mobile. Un mince filet d'eau peut s'écouler entre les deux pour dissiper la chaleur créée par les frottements et lubrifier les pièces.

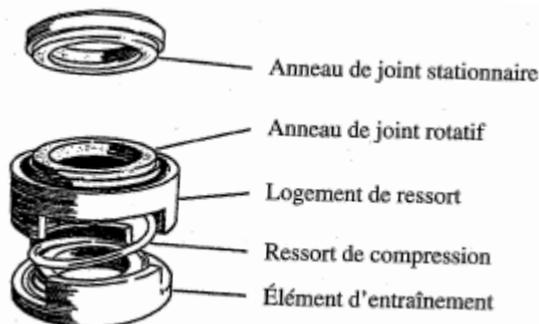


Figure 5 : Vue éclatée d'une garniture mécanique (ASTEE, 2005)

1.1.3.4 Généralités sur le dimensionnement des groupes motopompes

1.1.3.4.1 Paramètres hydrauliques

Afin de bien dimensionner une pompe immergée il faut tenir compte de plusieurs paramètres comme :

- Le débit maximal autorisé par la réglementation ou le débit d'exploitation maximum (fixé par un hydrogéologue),
- Le débit de pompage souhaité au point de service (calculé par rapport aux besoins),
- La hauteur géométrique nécessaire : différence entre l'altitude du point de livraison de l'eau et le niveau dynamique de la nappe (Figure 6),
- Les pertes de charges linéaires et singulières entre la crépine d'aspiration de la pompe et le point de livraison.

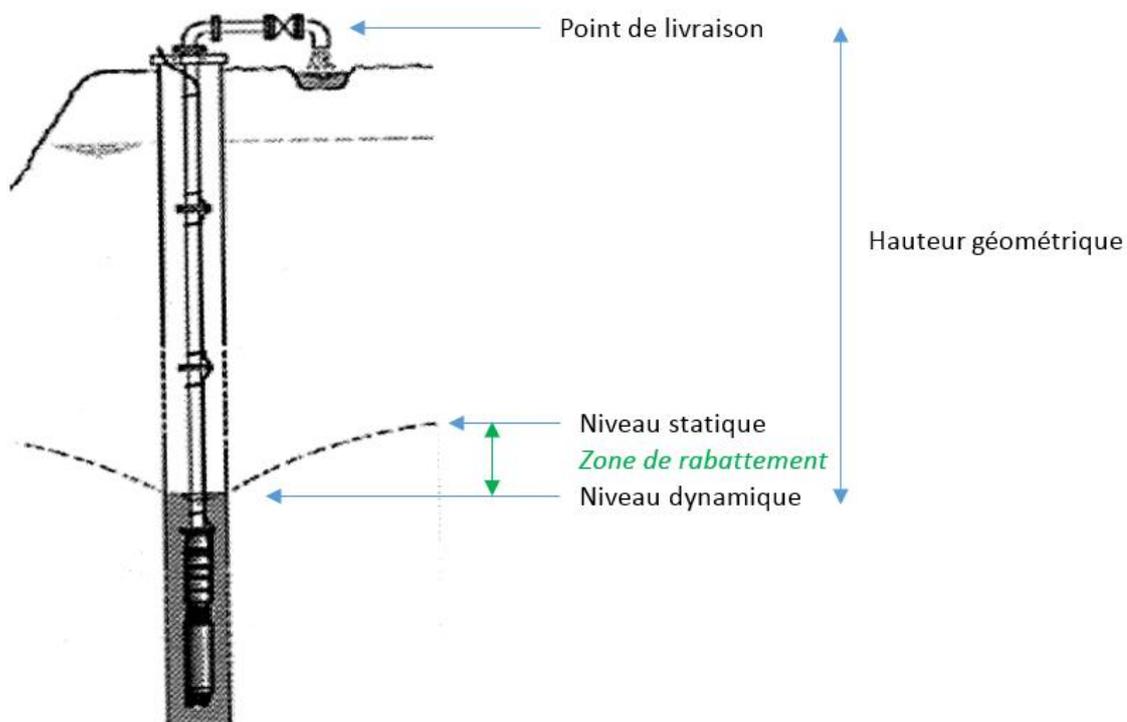


Figure 6 : Altitudes importantes à connaître pour le dimensionnement d'une pompe (adaptée de l'ASTEE, 2005)

Finalement, et comme l'Équation 1 : Dimensionnement de la HMT d'une motopompe, l'équation 1 le met en évidence, la motopompe doit être dimensionnée de telle sorte que pour le débit de pompage désiré, elle soit capable d'élever l'eau jusqu'au point de livraison, malgré les pertes de charges.

Équation 1 : Dimensionnement de la HMT d'une motopompe

$$HMT(Q) = \text{Hauteur géométrique}(Q) + \text{Pertes de charges}(Q)$$

Avec :

- $HMT(Q)$, la hauteur manométrique totale de la motopompe à dimensionner (en m),
- $\text{Hauteur géométrique}(Q)$, la différence d'altitude que la motopompe doit compenser (m),
- $\text{Pertes de charges}(Q)$, les pertes de charges singulières et linéaires (en m),
- Q , le débit souhaité ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

Les constructeurs de pompes fournissent la courbe caractéristique de pompe (ou courbe débit – HMT). Un exemple de courbe est fourni en Annexe 3.

Les motopompes présentent un point de fonctionnement idéal. En ce point, le débit et la HMT sont tels que le rendement est maximal. Il convient de choisir une pompe dont le fonctionnement réel se rapprochera du point idéal. Le nombre de roues, le rognage (réduction du diamètre) de ces roues et la vitesse de rotation de l'arbre peuvent être ajustés pour que la courbe de pompe se rapproche du point de fonctionnement attendu par l'exploitant.

1.1.3.4.2 Paramètres électriques

Le rendement du groupe motopompe (Équation 2) est un critère important en exploitation.

Équation 2 : Rendement global du groupe de pompage

$$\eta_{global} = \frac{P_{fluide}}{P_{elec}}$$

Avec :

- P_{elec} , la puissance électrique absorbée par le moteur,
- P_{fluide} , la puissance hydraulique transmise au fluide par la pompe,
- η_{global} , le rendement global du groupe de pompage.

Au point de fonctionnement idéal, le rendement du groupe motopompe est plus important. Une pompe avec un bon rendement est moins énergivore qu'une pompe avec un rendement faible.

Les caractéristiques du fluide peuvent avoir un impact sur la puissance absorbée par le moteur. Cette dernière augmente quand le liquide transporté a une masse volumique supérieure à celle de l'eau claire (KSB, 2005).

Ainsi, le choix d'une motopompe dépend de critères hydrauliques et électriques. Cependant, des aspects mécaniques peuvent influencer le choix du groupe motopompe. Certaines pompes sont plus adaptées à des liquides à fortes températures, d'autres sont mieux adaptées aux fluides chargés ou corrosifs, etc. Si la pompe est mal choisie, elle risque de vieillir prématurément. Il est donc intéressant de comprendre les phénomènes de vieillissement afin de réaliser les meilleurs choix technico-économiques adaptés aux forages de la Société des Eaux de l'Est.

1.2 Phénomènes influençant le vieillissement des motopompes de forages

1.2.1 Notions de durée de vie et de vieillissement

La durée de vie d'une pompe peut se quantifier par sa durée de fonctionnement avant d'être remplacée. Une pompe peut cesser de fonctionner suite à un phénomène ponctuel ou se dégrader progressivement dans le temps. Dans ce dernier cas, la pompe perd graduellement en efficacité : son rendement diminue. Il s'agit de **vieillessement** : c'est un phénomène normal. Une pompe usée peut ne plus être adaptée aux contraintes d'exploitation, en fournissant un débit plus faible que celui désiré par exemple.

Les objets sont conçus pour avoir une certaine durée de vie technique (aussi dite intrinsèque). Les défauts de fabrication sont rares (OIE, 1996), de ce fait il est peu fréquent d'observer une motopompe dont la durée de vie est significativement plus faible que ses homologues.

Dans les faits, une pompe de forage est généralement remplacée :

- Quand elle cesse de fonctionner,
- Lors d'une opération de maintenance du puits.

En effet, à l'occasion d'inspection, de nettoyage ou de régénération de forage, la pompe est déposée pour permettre l'entretien de l'ouvrage. Ces opérations nécessitent parfois la venue d'une grue et interrompent la continuité de service⁴. Si cela est jugé pertinent pour des raisons économiques, la pompe peut être remplacée à ce moment-là, même si elle fonctionnait encore. Parfois, un remplacement de pompe peut être planifié si le suivi métrologique de la pompe indique qu'elle a perdu en rendement (augmentation de la puissance électrique pour une même puissance hydraulique fournie, ou moindre).

Il est utile pour un exploitant de pouvoir prévoir le vieillissement des installations qu'il gère et d'anticiper les arrêts de motopompes. Pour prétendre à cela, il est nécessaire de comprendre les phénomènes qui dégradent les équipements (INERIS, 2009).

Il faut distinguer la cause de l'arrêt et la cause de la défaillance (Poulain, 1997). La cause de l'arrêt peut par exemple être un défaut d'isolement du moteur. L'identification de la cause de défaillance demande un diagnostic plus poussé afin de comprendre ce qui a mené au défaut d'isolement. La défaillance peut se définir comme étant «la cessation de l'aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise » (ASTEE, 2005). Ainsi, il faut remonter du symptôme (arrêt) à la cause de la défaillance (diagnostic) afin de proposer des solutions techniques (remède) pour espacer les arrêts de pompe.

Comme l'illustre la Figure 7, plusieurs phénomènes influencent le vieillissement des groupes motopompes, en les encrassant ou en les usant. C'est le cas de la corrosion et du colmatage.

Dans plus de 50 % des cas à la SEE, les pompes sont retirées suite à un défaut électrique. Ce défaut qui touche le moteur peut être lié directement aux éléments du moteur, mais parfois, c'est l'usure des pièces hydrauliques ou de pivoterie qui engendrent le défaut sur le moteur. L'usure des pièces peut créer des forces de frottements que le moteur compense en appelant plus de puissance. Alors il s'échauffe et un court-circuit se produit. **Les phénomènes peuvent donc être liés entre eux.**

La partie suivante présente d'abord les phénomènes qui peuvent user les pièces puis évoque les mauvaises conditions d'utilisation qui accélèrent le vieillissement des isolants électriques.

⁴ En eau potable, la continuité de la distribution d'eau est un enjeu du service public. Dans le contexte industriel de la SEE, l'eau sert au process mais aussi au refroidissement de réacteurs. Le service doit donc ici aussi être continu, et des pénalités financières peuvent être appliquées en cas d'interruption du service. Il est préférable d'avoir en permanence tous les forages mobilisables.

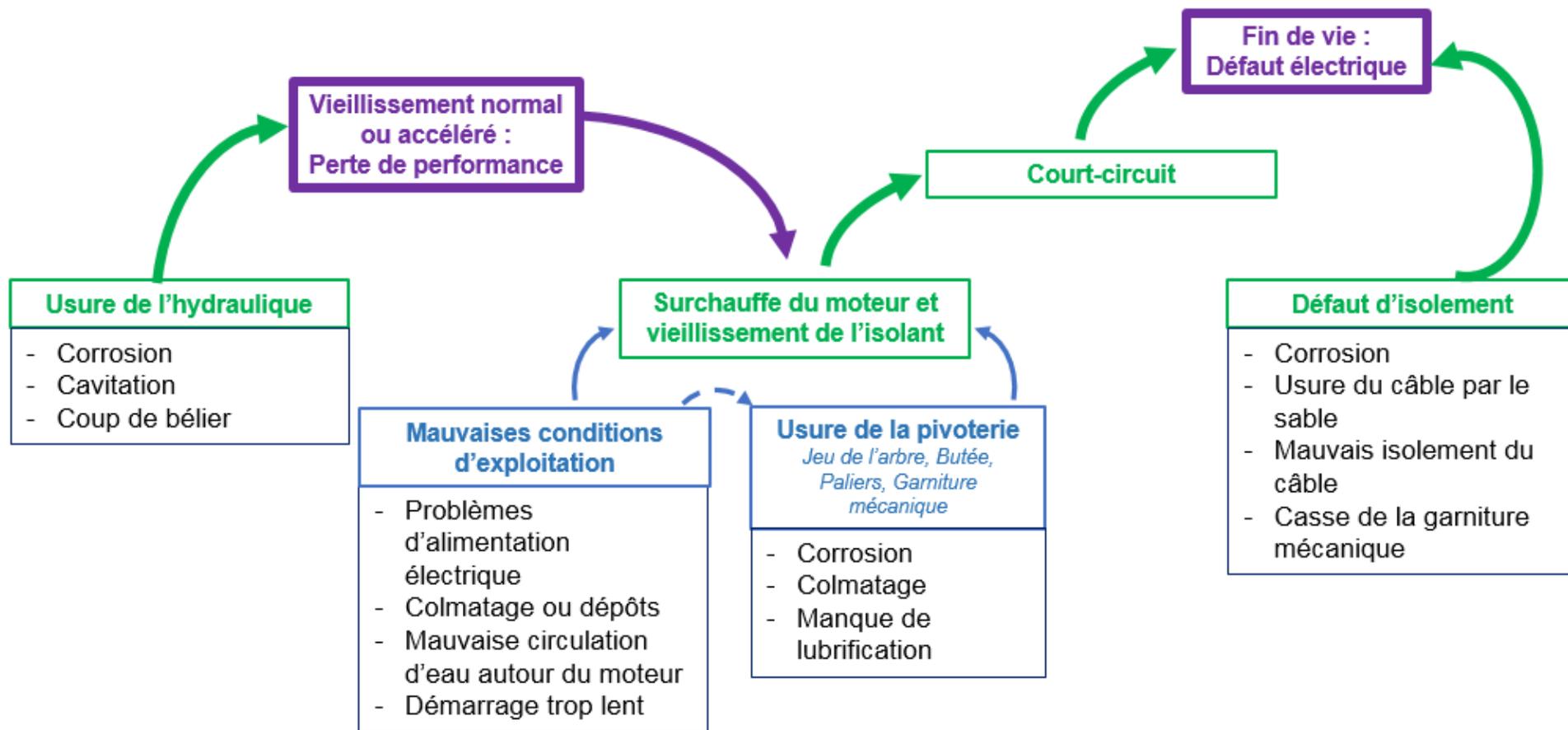


Figure 7 : Schéma des principales causes de vieillissement et de fin de vie des groupes motopompes

1.2.2 Usure des pièces

1.2.2.1 Pièces soumises à l'usure

L'usure de l'hydraulique peut faire perdre de la performance à la pompe. Pour une même hauteur manométrique fournie, le débit délivré est plus faible et la consommation électrique augmente. Le rendement diminue.

Certaines pièces sont soumises à des frottements ou à de l'abrasion au contact d'une autre pièce ou du fluide pompé s'il est chargé en particules solides. Les principales pièces d'usure d'une pompe immergée sont ((Grundfos, [ca 2015]), (ASTEE, 2005)) :

- Les paliers lisses ou coussinets,
- La butée axiale,
- L'arbre,
- La roue,
- La garniture mécanique,
- Les joints d'étanchéité.

L'usure et les pertes de performance peuvent être dues à la qualité du fluide transporté : plus ou moins corrosif, colmatant ou chargé de particules. De plus, une mauvaise lubrification des pièces liée aux conditions d'exploitation peut aussi occasionner des frottements et donc de l'usure prématurée. Des phénomènes physiques de cavitation et de coup de bélier peuvent également conduire à des problèmes mécaniques sur les pièces, et les fragiliser.

1.2.2.2 Corrosion

1.2.2.2.1 Préambule

La corrosion est un phénomène qui arrache des ions métalliques à une structure et peut engendrer des dépôts ailleurs. Elle peut aussi bien percer des équipements que former des concrétions à leur surface. Ainsi, elle use les pièces et crée des pertes de charges en d'autres endroits.

La partie suivante vise à présenter les mécanismes de la corrosion ainsi que certains cas de sa manifestation. **Le lecteur pourra s'appuyer sur le glossaire de chimie disponible en Annexe 4.**

1.2.2.2.2 Mécanismes de la corrosion

Lorsqu'une solution contenant des ions (électrolyte) est en contact avec un métal, elle peut lui arracher des éléments métalliques. Comme l'illustre la Figure 8, un ion métallique se détache et s'oxyde, offrant ainsi à la solution un électron qui peut être capté par des ions en solution. Ceux-ci seront alors réduits. La corrosion du métal dans le milieu aqueux ne se fait que si des éléments en solution sont capables de capter un électron (Crolet, et al., 1998).

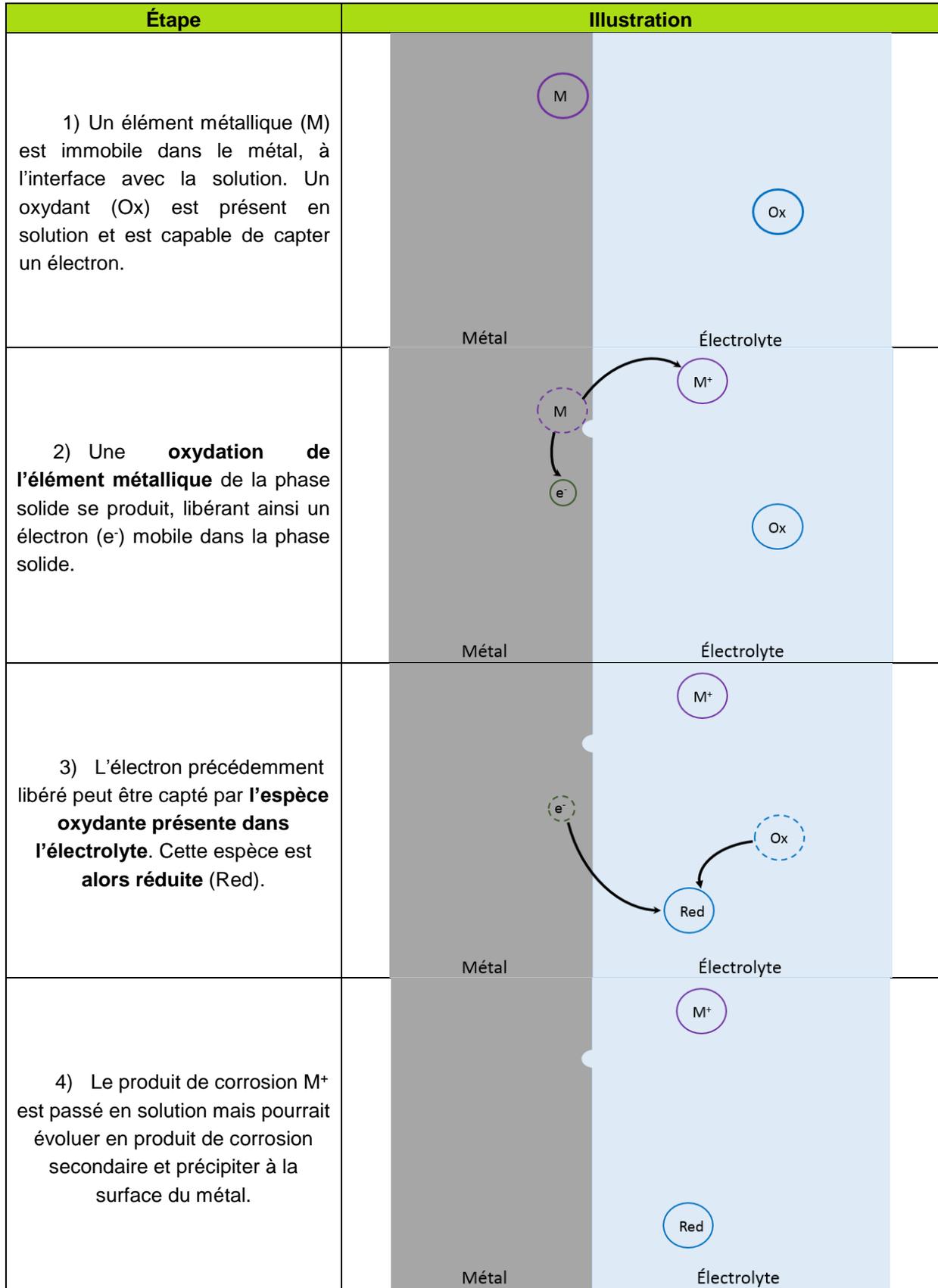


Figure 8 : Schéma des étapes de la corrosion, réaction électrochimique

L'oxydation du métal a principalement lieu au sein d'une fine pellicule d'eau à la surface du métal, nommée **couche limite de diffusion**. Après avoir traversé cette couche les éléments chimiques peuvent rejoindre la solution aqueuse et être transportés par convection. Les déplacements dans la couche limite de diffusion sont lents. Il peut y avoir un phénomène d'accumulation, aussi dit d'enrichissement en cations métalliques. Cet enrichissement local en produits de corrosion entraîne parfois leur précipitation sur le métal. Parallèlement, un phénomène d'épuisement en composants oxydants de la solution se produit. Ces barrières occasionnent alors le phénomène de **polarisation de diffusion** qui influence la cinétique des réactions de corrosion (Crolet, et al., 1998).

La corrosion est influencée par de nombreux paramètres dont ((Crolet, et al., 1998), (Dagbert, 2009), (Detay, 1993), (Mabillot, 1971)) :

- Le potentiel d'oxydo-réduction de la solution,
- La présence de chlorures et de sulfures,
- La présence de gaz dissous (O₂, CO₂, H₂S, etc.) dans la solution,
- Le pH,
- La température,
- La vitesse d'écoulement de l'eau,
- La nature et la diversité des matériaux présents dans le forage,
- Le biofilm et le type de bactéries présentes (Page 27).

Des indicateurs peuvent être calculés pour évaluer le caractère corrosif de l'eau en fonction de sa composition chimique. Il s'agit de l'indice de Larson et de Leroy. Parallèlement, l'indice de Langelier donne des indications sur l'agressivité⁵ de l'eau. Leur calcul est décrit en Annexe 5.

La vitesse de corrosion est difficile à prévoir puisqu'elle dépend de nombreux paramètres autres que la composition chimique de l'électrolyte. La modification d'un paramètre (comme la dissolution d'un gaz par exemple) peut modifier le potentiel d'oxydo-réduction, etc. La corrosion peut par endroit arracher de la matière, quand elle en déposera ailleurs. De plus, elle a des faciès et des origines différentes, et qui peuvent être présents en même temps dans le forage. Il est donc difficile de modéliser ce phénomène.

1.2.2.2.3 Différents faciès de corrosion

La corrosion a différents faciès : généralisé ou localisé (Crolet, et al., 1998). La corrosion généralisée est une perte de masse uniformisée sur toute la surface d'un métal. Elle est fréquemment rencontrée mais n'est pas la plus dangereuse pour les installations. Parfois, la corrosion est localisée. Elle est principalement initiée par des irrégularités sur la surface du matériau métallique, alors rendu moins résistant. C'est le cas de la corrosion cavernueuse qui se produit à la jonction entre deux plaques de métal, ou de la corrosion par piqûre qui s'étend à partir d'un percement. La corrosion sous tension survient quant à elle suite à l'apparition d'une fissure due à des contraintes mécaniques sur le support. Ces irrégularités facilitent la dissolution du métal et peuvent créer des conditions favorables à la corrosion. En effet, les produits de corrosion sont parfois eux-mêmes corrosifs.

1.2.2.2.4 Phénomènes naturels de résistance à la corrosion

Il existe des **phénomènes naturels de résistance à la corrosion** dont les principaux sont (Crolet, et al., 1998) :

- 1) L'inertie chimique : l'inertie chimique est une propriété qu'ont certains métaux et qui leur confère une grande stabilité. Leur vitesse de dissolution est très faible. C'est le cas de l'or, du platine, ou du nickel par exemple.
- 2) La passivité : certains métaux et alliages sont passivables. Cela signifie qu'au contact de l'eau le métal s'oxyde et se dissout. Finalement, une couche protectrice d'oxydes insolubles se forme à sa surface. La nature de cette couche est variable. Pour le fer et les aciers inoxydables la couche passive résulte de

⁵ Capacité de l'eau à ronger le calcaire (qui s'est généralement déposé sur les parois des canalisations et les protège) puis à corroder les canalisations.

l'adsorption de composés oxygénés (ions hydroxydes OH^- par exemple). Cette couche n'est pas toujours stable et peut être érodée.

- 3) La protectivité des dépôts : les dépôts peuvent perturber les réactions de corrosion. En effet, ils interfèrent avec la circulation d'éléments dans la couche limite de diffusion. Selon leur nature physico-chimique, ils peuvent soit ralentir soit accélérer la vitesse de corrosion.

1.2.2.2.5 Corrosion galvanique et protection cathodique

Lorsque le métal est hétérogène ou que deux métaux différents sont assemblés, la contribution de chaque zone à la corrosion varie. Il y a localement apparition d'un pôle électrique positif et d'un pôle négatif : comme une pile géante. Le courant circule soit sous forme électronique dans le métal, soit grâce aux ions dans la solution. Le matériau le plus noble devient la cathode (receveur de matière) quand le moins noble devient l'anode (donneur d'ions métalliques). La noblesse d'un matériau est évaluée par son potentiel de corrosion. Ce dernier dépend notamment du milieu dans lequel il se trouve, il n'est pas une valeur intrinsèque. Plus ce potentiel est élevé, plus le matériau est noble (Creus, et al., 2013). Les matériaux peuvent être classés selon leur noblesse dans une série galvanique (Annexe 6). L'argent est plus noble que le bronze, lui-même plus noble que l'acier doux.

Plus la différence de potentiel est élevée entre les deux pôles, plus la vitesse de dissolution du métal est importante.

Les matériaux du tubage des forages sont parfois de nature différente selon la profondeur. De même, une pompe peut être constituée de plusieurs matériaux. La **différence de potentiel de corrosion** entre les deux matériaux peut créer un effet de pile géante. Alors, certaines parties du forage ou de la pompe se corrodent et cèdent de la matière quand d'autres sont protégées : c'est la corrosion galvanique.

Si ce principe est utilisé à l'inverse, pour protéger une structure, l'expression « protection cathodique » est utilisée. Des anodes sacrificielles (généralement en zinc, aluminium voire en magnésium) peuvent être placées sur des structures. Elles se dissolvent à la place du métal à protéger. Cependant, les anodes sacrificielles sont difficiles à dimensionner. De plus elles nécessitent une vérification périodique (une à deux fois par an), ce qui n'est pas compatible avec la difficulté que représente la logistique d'une remontée de pompe (Vedel, 2019).

Les plastiques sont résistants à la corrosion (Smith, 1995). Ainsi, les tubages en PVC pourraient être un bon moyen de lutter contre la corrosion dans les forages. Toutefois, ils ont aussi des inconvénients : ils sont plus fragiles que l'acier en cas de heurt pendant une opération de maintenance par exemple.

1.2.2.2.6 Biocorrosion

La biocorrosion est la corrosion induite par des organismes vivants comme les algues, ou plus fréquemment les bactéries (cas principalement étudié dans le présent rapport). L'activité microbiologique serait le facteur le plus important dans les réactions d'oxydo-réduction en eau souterraine (Smith, 1995). La biocorrosion n'est pas un type de corrosion à part entière mais fait intervenir différents processus précédemment expliqués. Il y a biocorrosion si et seulement si l'activité biologique occasionne des changements de cinétique de corrosion (Dagbert, 2009). Si la corrosion n'est pas influencée par des êtres vivants, elle est dite « abiotique ». Différentes espèces de bactéries peuvent amener à un changement de cinétique de corrosion par différents mécanismes.

Toute structure immergée se recouvre rapidement d'une couche de matière organique contenant des bactéries et des nutriments : c'est le biofilm. Ces bactéries sont protégées dans un amas de sucres (exopolymères extracellulaires (EPS)) qu'elles génèrent elles-mêmes. Le biofilm peut avoir l'aspect d'un film visqueux blanc ou parfois d'une boue molle colorée (Mabillot, 1971).

Les espèces de bactéries peuvent avoir des propriétés différentes. Certaines d'entre elles protègent le matériau en produisant des agents surfactants. D'autres bactéries consomment des agents passivants et autres inhibiteurs de corrosion. Elles peuvent parfois produire des sels concentrés, des nitrates, ou encore des agents corrosifs comme les acides. Cela diminue le pH et favorise la corrosion.

Lorsque la couche de biofilm est fine, ce sont principalement les bactéries aérobies (capables de respirer à partir du dioxygène dissous) qui sont présentes. Certaines d'entre elles sont :

- **Des bactéries sulfo-oxydantes** : capables de produire de l'acide sulfurique, corrosif,
- **Des bactéries ferro-oxydantes** : transformant l'ion ferreux (Fe^{2+}) en ion ferrique (Fe^{3+}), ce qui augmente le pouvoir oxydant de la solution et peut donc accélérer les phénomènes de corrosion (plus d'électrons peuvent être captés),
- **Des micro-organismes mangano-oxydants (MOMO)** : oxydant les ions manganoux (Mn^{2+}) en oxydes de manganèse. Ceux-ci étant de puissants oxydants, la vitesse de corrosion peut augmenter.

Les produits de corrosion ont tendance à rester dans le biofilm. Les oxydes de fer et de manganèse lui confèrent respectivement une couleur orange ou noire.

Quand la couche de biofilm est plus épaisse (parfois seulement localement) un gradient d'oxygène apparaît. Le dioxygène se fait rare au niveau de la surface métallique. Des bactéries anaérobies (n'ayant pas besoin d'oxygène pour respirer) sont présentes à l'interface entre le métal et le biofilm. Les bactéries anaérobies regroupent notamment **des bactéries sulfurogènes**. Parmi elles il faut citer les **bactéries sulfato-réductrices (BSR)** dont les **thiosulfato-réductrices (BTR)**. Ces bactéries produisent des sulfures et de l'hydrogène sulfuré. Ces composés changent les caractéristiques du milieu en l'acidifiant et en le rendant plus favorable à la corrosion.

Les espèces de bactéries ne sont pas les mêmes sur l'épaisseur du biofilm, mais elles sont aussi différentes en fonction de la profondeur dans le forage. La qualité de l'eau peut évoluer en fonction des horizons que rencontre le tubage. De plus, dans la zone de rabattement (Figure 6), l'alternance de milieu réducteur et oxydant conduit à la présence d'un faune microbienne spécifique (Smith, 1995).

La biocorrosion dépend fortement de la vitesse d'apport de nutriments dans le biofilm. Plus le flux nourricier est important plus les bactéries ont d'énergie pour corroder les supports.

La corrosion a donc différents faciès et différentes origines. Elle est difficile à pallier. Toutefois, l'utilisation de matériaux nobles permettrait d'augmenter la durée de vie des pompes (SNECOREP, 2010).

La corrosion est difficile à diagnostiquer et peut être associée à des phénomènes de dépôts. Le colmatage cache alors des arrachements de matière. La corrosion ronge parfois le matériau des tubages voire détruit les crépines. Dans ce cas, des venues de sables peuvent être constatées dans le forage (Mabillot, 1971). Du matériel grossier risque alors d'être pompé ou de colmater l'ouvrage et le système de pompage.

1.2.2.3 Colmatage

1.2.2.3.1 Définition

Le colmatage est l'obstruction d'orifices par des dépôts. Il peut recouvrir les crépines ou envahir le corps de pompe. Les pertes de charges augmentent, la pompe doit les compenser et est amenée à vieillir plus rapidement.

Les dépôts peuvent être de deux types :

- Friable, comme du tartre,
- Avec l'aspect d'une boue molle, pâteuse ou gélatineuse (Mabillot, 1971).

Il y a différents mécanismes de colmatage comme :

- Le colmatage mécanique et physico-chimique : respectivement causé par des éléments grossiers (sables ou graviers) ou des matériaux fins (argiles ou limons),
- Le colmatage chimique : incrustation par les carbonates ou précipités formés par les composés ferreux ou manganoux,
- Le colmatage biologique : boues biologiques.

1.2.2.3.2 Colmatage mécanique ou physico-chimique

Le colmatage mécanique est l'encombrement des crépines du forage ou des pompes par des sables ou graviers. Le colmatage physico-chimique est quant à lui le colmatage causé par les argiles et limons. Ils peuvent notamment se produire lorsque la corrosion a fortement rongé les crépines, augmentant leur section. Le massif filtrant (graviers autour du tubage, voir Figure 2) peut alors pénétrer dans le forage. Les photographies suivantes (Figure 9 et Figure 10) illustrent une intrusion de massif filtrant dans des forages de la Société des Eaux de l'Est.



Figure 9 : Massif filtrant engagé dans les crépines du forage (Rapport d'inspection télévisée du forage 205b, Gewatec, 2014)



Figure 10 : Massif filtrant évacué par air-lift du forage 234 (Gewatec, 2014)

1.2.2.3.3 Colmatage chimique

Le colmatage chimique est catalysé par deux phénomènes :

- L'apport de dioxygène qui favorise la corrosion et donc parfois la formation de dépôts,
- Le dégagement de dioxyde de carbone sous forme gazeuse qui entraîne la précipitation des carbonates.

La concentration en dioxyde de carbone (CO₂) dissous dans l'eau dépend des conditions de pression et de température. La pression et la concentration en CO₂ dissous évoluent dans le même sens (loi de Henry).

Dans un forage, la pression diminue principalement dans deux cas :

- Au moment du rabattement de la nappe (Mabillot, 1971),
- Au passage de l'eau dans les crépines ((Detay, 1993), (Smith, 1995)).

Au démarrage du pompage, le niveau d'eau dans le forage diminue : c'est le rabattement. La pression dans l'ouvrage est donc plus faible qu'avant le pompage. La chute de pression liée au rabattement conduit à la libération de CO₂, et précipite une partie des carbonates contenus dans l'eau. Ces carbonates peuvent se fixer dans les pores de l'aquifère.

Une autre raison de la formation de dépôts est l'augmentation de la vitesse de l'eau à l'entrée du forage lors de son passage à travers la section des crépines ((Detay, 1993), (Smith, 1995)). La variation de vitesse crée une variation de pression. Le cisaillement de la veine liquide induit un dégazage. Les carbonates deviennent moins stables et précipitent. Cependant, un phénomène de retard fait qu'ils précipitent plutôt dans la canalisation de refoulement ou sur le dispositif de pompage que sur le tubage ou dans le massif filtrant (Detay, 1993). Une fois que l'eau a franchi les crépines, le gaz carbonique peut de nouveau se dissoudre (la diminution de la vitesse augmente la pression). Il se dissout généralement avant d'avoir pu mettre en solution les carbonates nouvellement formés. L'eau peut devenir très acide localement.

Le dégagement de dioxyde de carbone influence aussi le potentiel d'oxydo-réduction et déplace les équilibres de solubilité du dioxygène, du fer et du manganèse. Alors, des hydroxydes de fer ou de manganèse, peu solubles ont tendance à se former et à se mélanger aux dépôts de carbonates. Ces éléments donnent une couleur rouge ou noire aux dépôts (Detay, 1993).

De plus, lorsque des eaux de composition différente (ne provenant pas du même horizon de l'aquifère) se rencontrent, le mélange doit s'équilibrer. Des carbonates précipitent et des hydroxydes de fer ou de manganèse se forment généralement à cette occasion.

Le colmatage chimique est aussi différent selon la profondeur dans le forage. La zone qui n'est jamais en eau n'est pas atteinte de la même façon par ces réactions qu'une zone continuellement immergée ou que la zone de rabattement ((Detay, 1993), (Creus, et al., 2013)).

1.2.2.3.4 Colmatage biologique

Le colmatage mécanique est celui le plus fréquemment reconnu pour la perte de performance d'un système de pompage. Toutefois, il semblerait que le premier contributeur au colmatage est le biofilm, ou l'alliance du colmatage biologique avec une autre forme de colmatage (Smith, 1995).

Le colmatage biologique est souvent dû à des bactéries du fer et du manganèse, présentes au sein d'un biofilm.

Parfois il forme un film visqueux assez fin. Dans d'autres situations, il prend la forme d'une boue molle, orange (à cause d'oxydes de fer) et granuleuse car les produits de corrosion et les particules solides peuvent s'y glisser et y être retenus. Comme cela a été expliqué précédemment (Page 27), le biofilm est une forme de colmatage, mais il masque généralement une surface corrodée.

Il peut avoir le même effet que les filtres biologiques utilisés dans les stations de traitement d'eau pour diminuer les concentrations en fer et en manganèse. Ainsi, les échantillons d'eau prélevés dans le forage ne sont pas forcément représentatifs de la qualité de la ressource, mais plutôt de la ressource après son passage par l'ouvrage (Smith, 1995).

1.2.2.3.5 Solutions face au colmatage

Les problématiques d'eaux chargées et de colmatage peuvent être anticipées et réduites au moment de la conception de l'ouvrage et lors de l'exploitation du système :

- En assurant un bon développement du forage (mise en place du massif filtrant),
- En choisissant une granulométrie du massif filtrant cohérente avec la taille des crépines,
- En adaptant le dimensionnement des crépines au massif filtrant et en les calculant pour une vitesse d'écoulement de 3 cm.s^{-1} (Mabillot, 1971).

En parallèle, si des problématiques apparaissent une fois que l'ouvrage est construit, il est possible d'adapter le débit de pompage afin de ne pas mobiliser le massif filtrant, les particules solides, etc.

Enfin, des techniques de régénération peuvent être utilisées sur les forages de façon périodique en vue de retrouver leur productivité initiale. Si le tubage est perforé ou que les crépines sont élargies et laissent passer du massif filtrant, il faut opter pour un rechemisage du forage.

Au-delà des deux grands phénomènes que sont la corrosion et le colmatage, d'autres mécanismes peuvent fragiliser les groupes motopompes. C'est le cas de la cavitation et du coup de bélier.

1.2.2.4 Cavitation

La cavitation est le phénomène lié à la formation de bulles de gaz (dont la vapeur d'eau) dans des zones de la pompe où la pression est faible (inférieure à la pression de vapeur saturante). Elle peut être suivie par l'implosion des bulles de gaz dans des zones où la pression augmente. Les molécules d'eau changent d'état de liquide à gazeux et *vice versa* jusqu'à 1000 fois par seconde (OIE, 1996). Ces implosions sont puissantes et peuvent fortement abîmer les roues et détériorer le corps de la pompe. Elles produisent un son de graviers qui s'entrechoquent.

Une façon de prévenir la cavitation est de respecter une profondeur minimale d'installation de façon à avoir un NPSH (*net positive suction head*, ou hauteur d'aspiration positive nette) disponible supérieur au NPSH requis. Le NPSH est la différence entre la pression absolue totale du liquide en un point et sa pression de vapeur saturante.

1.2.2.5 Coup de bélier

Le coup de bélier est un phénomène transitoire qui peut se produire suite à la fermeture brusque d'une vanne ou à l'arrêt d'une pompe. Il se traduit par une onde de surpression et de dépression. Les ondes de surpression peuvent détruire l'installation de pompage notamment en déformant le corps de pompe ou en modifiant l'axe de rotation. Des protections anti-bélier existent.

De plus, il peut y avoir un phénomène de coup de clapet (Delorme, 2019). En effet, un clapet est généralement présent au sommet de la pompe, au niveau du refoulement (Figure 4). Si la fermeture du clapet est trop lente par rapport au déplacement de l'onde de surpression, il peut être endommagé. Il ne protégera plus la pompe et le forage d'un retour d'eau. L'hydraulique de la pompe sera alors soumise à des risques de détérioration. Le phénomène est parfois amplifié si un clapet anti-retour est positionné sur le refoulement du forage alors que la pompe possède déjà un clapet de retenue.

Les causes d'usure des pièces sont donc multiples. Elles sont biologiques, chimiques ou physiques. Cependant, le vieillissement des groupes motopompes peut aussi être lié à des problématiques électriques.

1.2.3 Défaits électriques

1.2.3.1 Types de défauts électriques

Les défauts électriques peuvent être dus à :

- Un défaut d'isolement,
- Un court-circuit dans le moteur.

1.2.3.2 Défaut d'isolement

Un défaut d'isolement est une fuite de courant en dehors du circuit électrique. Les câbles électriques alimentant le moteur sont situés dans l'eau. Si du sable est présent ou qu'une autre source d'abrasion existe, cela risque de dénuder les câbles et d'occasionner un défaut d'isolement.

De plus, une portion de câble est directement intégrée dans le moteur, mais un autre câble est soudé afin de remonter dans le forage jusqu'à l'armoire électrique alimentant la pompe. Une chambre de jonction est donc réalisée. Si elle n'est pas bien accomplie ou qu'elle s'est abîmée, elle peut présenter un défaut d'étanchéité (Deschamp, 2019).

En outre, si la garniture mécanique casse, elle ne protège plus le moteur d'une entrée d'eau.

L'eau, la carcasse du moteur et la colonne d'exhaure ou le tubage du forage sont généralement conducteurs. Des mises à la terre permettent de pallier les fuites de courant électrique à travers les éléments métalliques du groupe motopompes ou du forage.

1.2.3.3 Surchauffe du moteur et court-circuit

1.2.3.3.1 Vieillessement de l'isolant électrique

Pour rappel, le stator du moteur est communément constitué de bobinages de cuivre alimentés par un courant électrique. Ces bobinages doivent être protégés par des isolants.

Il y a plusieurs niveaux d'isolants électriques. Les fils sont recouverts d'un vernis émaillé (en polyester ou polyuréthane par exemple). Ensuite, un papier isolant (film en matériau isolant) permet d'isoler les phases. Enfin, une résine ou un vernis d'imprégnation viennent compléter l'isolation. Cela confère au bobinage des propriétés supplémentaires de tenue mécanique face aux vibrations, à la corrosion, etc. (Loubeau, 2016).

Les bobinages des pompes immergées sont généralement recouverts soit d'un vernis d'imprégnation, soit d'un matériau comme le PVC (polychlorure de vinyle) ou le PE²+PA (polyéthylène et polyamide). Dans le cas d'un isolant en PE²+PA, le moteur est dit à « bobinage renforcé ».

Les isolants peuvent vieillir à cause de contraintes mécaniques, thermiques, environnementales ou électriques (CEI, 2014). Plusieurs contraintes peuvent être liées. Cependant, la température est très souvent le principal facteur de vieillissement (AFNOR, 2008).

Lorsque la température augmente, le matériau isolant peut subir des phénomènes de thermo-oxydation, dépolymérisation, etc. Il est alors fragilisé. Parallèlement, le fil conducteur peut se dilater (selon son coefficient d'expansion thermique) exerçant alors des contraintes de cisaillement sur le matériau isolant qui là aussi se fragilise.

La durée de vie de l'isolant est reliée par une loi d'Arrhenius à la température (Annexe 7). Cette loi exponentielle traduit la fragilisation de l'isolant. En effet, quand l'isolant vieillit, l'énergie d'activation nécessaire pour rompre des liaisons est plus faible (Mortaigne, 2005).

La norme internationale 60505 (CEI, 2014) note que pour de nombreux isolants, l'expérience a montré que la durée de vie est divisée par 2 pour une augmentation constante de température entre 8 et 15°C.

Il existe différentes classes thermiques d'isolants (AFNOR, 2008). Les classes sont indiquées dans l'Annexe 8. Elles sont définies en fonction de la température continue maximale que les isolants peuvent supporter pour une durée de vie fixée, souvent à 20 000 h (AFNOR, 2013). La classe thermique la plus faible est de 90°C et s'identifie par la lettre Y. Le PVC et le PE²+PA font partie de cette classe thermique d'isolants.

Ainsi, un échauffement du moteur altère la qualité de l'isolant du bobinage. Le vieillissement de l'isolant fait alors diminuer la durée de vie du groupe motopompe. À terme, l'isolant peut fondre ou se craqueler. Deux fils de cuivre peuvent entrer en contact, ce qui occasionne un court-circuit et détruit le moteur.

La surchauffe du moteur peut être liée à des problèmes d'alimentation électrique comme une surtension ou sous-tension, une mauvaise protection de la connexion au réseau électrique ou encore un pic d'intensité au moment du démarrage. À titre d'exemple, une sous-tension de 10 % sur un moteur à pleine charge occasionne une augmentation de la température du moteur de 20 % (Grundfos, [ca 2015]).

D'autres causes d'échauffement sont mécaniques ou physiques. Il est possible de citer :

- L'ensablement de la base du moteur,
- Le colmatage de l'aspiration,
- Un jeu de la pivoterie,
- Un blocage de l'arbre.

Dans ces trois dernières situations, la résistance à la rotation de l'arbre augmente. Le moteur va augmenter la puissance qu'il développe afin de vaincre les frottements. La tension d'alimentation électrique étant stable (définie par le réseau), c'est uniquement l'intensité appelée qui est plus forte. Par effet Joule, un échauffement des enroulements apparaît.

Une sonde de température peut être placée dans le moteur. Elle mesure la température de son liquide de refroidissement interne. La température ne doit pas dépasser 60 voire 40°C (Grundfos, [ca 2012]) .

Un moteur surdimensionné (en termes de puissance) aura potentiellement moins tendance à s'échauffer, mais il consommera plus d'électricité.

Ainsi, les causes d'échauffement des bobinages sont multiples, certaines sont ponctuelles et d'autres sont continues lors du fonctionnement du groupe de pompage. De bonnes conditions de fonctionnement et de refroidissement sont donc nécessaires.

1.2.3.3.2 Mauvais refroidissement

1.2.3.3.2.1 Conditions du bon refroidissement

Il est préconisé par les constructeurs de groupes motopompes d'avoir une vitesse de circulation d'eau autour du moteur d'au moins 0,30 m.s⁻¹ ((Vedel, 2019), (Grundfos, [ca 2015])). Cela permettrait d'assurer son refroidissement. La valeur minimale conseillée dépend des fabricants, et de la puissance du moteur.

La formule de calcul de la vitesse moyenne de circulation d'eau autour du moteur est présentée en Annexe 9.

Si l'espace annulaire entre le tubage du forage et le moteur est faible, il permet parfois de respecter cette vitesse. De plus, il faut que le groupe de pompage soit situé au-dessus des crépines du forage afin que tout le flux passe au niveau du moteur (Figure 11). Si l'espace entre la pompe et le tubage est trop grand pour respecter ces conditions de vitesse ou que la pompe est placée au niveau des crépines, une jupe de refroidissement peut être utilisée.

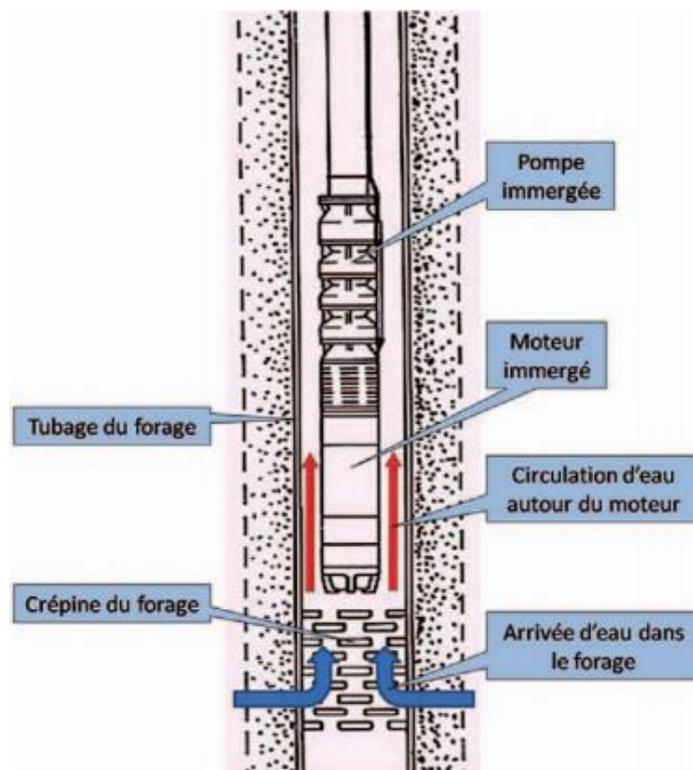


Figure 11 : Position idéale de la pompe dans le forage (SNECOREP, 2010)

1.2.3.3.2 Utilisation d'une jupe de refroidissement

Une jupe de refroidissement est comme un fourreau qui se place tout autour du moteur et qui est rattaché à la pompe au-dessus de sa crépine d'aspiration. La jupe force le passage de l'eau autour du moteur et augmente sa vitesse de passage. Elle est donc une solution palliative dans les cas où le moteur risquerait de ne pas être refroidi correctement à cause :

- D'une vitesse de circulation trop lente,
- D'un mouvement de l'eau qui ne longe pas l'ensemble du moteur.

1.2.3.3.3 Influence des dépôts

Les dépôts peuvent diminuer la capacité du moteur à se refroidir (KSB, 2005). Si le moteur est entouré de dépôts, il pourra moins facilement évacuer la chaleur. Il est difficile de savoir à partir de quelle épaisseur et pour quel type de colmatage une influence significative apparaît.

De plus, si le flux d'eau est insuffisant, des bulles d'air peuvent se déposer autour du moteur. L'air est un bon isolant et il pourrait empêcher l'eau fraîche qui s'écoule doucement de récupérer et d'évacuer la chaleur du moteur (Delorme, 2019).

Ainsi, la vitesse de l'eau autour du moteur et l'absence de dépôts sont des paramètres importants pour le bon refroidissement du moteur. Si un bon refroidissement est nécessaire, c'est parce que plusieurs causes engendrent un échauffement des bobinages du moteur. Ces dernières sont généralement liées à de mauvaises conditions d'exploitation.

1.2.3.3.3 Mauvaises conditions d'exploitation

1.2.3.3.3.1 Point de fonctionnement réel en dehors des plages recommandées

Les pompes sont fournies avec une courbe de fonctionnement théorique définie dans des conditions spécifiques de température, de concentration en particules solides faible, pour une eau non corrosive la plupart du temps. Les pompes des fournisseurs peuvent être fiables dans leur domaine d'application et ne plus l'être lorsqu'elles sont installées dans des forages aux conditions différentes.

Les fabricants de groupes motopompes donnent des indications sur les bonnes conditions d'utilisation de leur matériel. Par exemple, certaines pompes sont adaptées à des fluides plus ou moins chargés en particules solides, plus ou moins chauds, etc. Le fabricant peut aussi conseiller une plage de fonctionnement (autour du débit de point de fonctionnement de meilleur rendement). À défaut, la littérature (API, 2010) indique deux autres plages, dites étroite et étendue :

- Plage étroite : 80 – 110 %,
- Plage étendue : 70 – 120 %.

Initialement établis pour les applications à l'industrie pétrolière et du gaz naturel, ces intervalles se sont répandus dans les autres secteurs d'activités comme l'eau. Ces plages sont définies sur des critères mécaniques. En effet, lorsque le point de fonctionnement se décale trop à gauche ou trop à droite du point de fonctionnement idéal, les efforts radiaux augmentent, ce qui augmente la probabilité d'apparition de vibrations et leur amplitude. La durée de vie des paliers est alors réduite.

La durée de vie maximale d'une pompe est à son point de meilleur rendement. Si la plage de fonctionnement réel de la pompe déborde des plages de fonctionnement acceptées, alors des risques de vieillissement prématurés apparaissent. Le risque de cavitation augmente par exemple.

Il arrive que le point de fonctionnement réel soit en dehors des plages recommandées pendant le fonctionnement stabilisé ou uniquement pendant les phases de démarrage (la durée du rabattement). En effet, une pompe de forage ne fournit pas le même débit ni la même HMT tout au long de son fonctionnement. Dans les premières minutes, le rabattement se produit. Au départ, le niveau d'eau dans le forage est le niveau statique (ou pseudo-statique s'il est influencé par d'autres forages par exemple). La pompe a moins de HMT à fournir (la hauteur géométrique est minimale) et le débit est donc important. Puis, lorsque le niveau d'eau dans le puits diminue, le point de service se décale vers des débits plus faibles et une HMT plus élevée. Selon la durée du rabattement, la durée durant laquelle la pompe fonctionne en dehors de la plage conseillée peut être non-négligeable.

1.2.3.3.3.2 Durée de démarrage trop élevée

Pour le démarrage du groupe motopompe, plusieurs techniques peuvent être utilisées afin de limiter le pic d'intensité appelée par le moteur pour mettre le rotor en mouvement. En effet, le courant dit « à rotor bloqué », c'est-à-dire au démarrage de la pompe est 4 à 7 fois plus élevé que le courant nominal (Grundfos, [ca 2015]). Cet appel important pourrait endommager les réseaux électriques ou créer des chutes de tension.

Parmi les techniques de démarrage il est possible de citer la méthode étoile-triangle, le démarreur progressif, ou le variateur de fréquence. Des précautions sont à prendre avec ces techniques qui ont leurs avantages et inconvénients. Par exemple, l'utilisation d'un convertisseur de fréquence (souvent appelé variateur de vitesse) peut créer des problèmes de parasitage : les harmoniques. Cela peut interférer avec du matériel électronique comme les sondes de niveau ou les capteurs de pression. Il faut utiliser un filtre de sortie pour limiter les perturbations liées aux harmoniques.

Dans tous les cas évoqués, il convient d'éviter d'avoir une durée de démarrage supérieure à 3 secondes (Grundfos, [ca 2015]). Sinon, cela augmenterait la température du bobinage. Les pompes immergées dans un forage profond disposent d'une longueur de câble importante. Alors, la chute de tension générée par ce câble peut suffire à absorber le pic de courant. Un démarrage direct peut être adapté afin de ne pas échauffer le bobinage.

De plus, un démarrage trop lent occasionne le passage d'un flux lubrifiant insuffisant entre les deux éléments qui composent la butée. Ceux-ci viennent à brûler (Martaud, 2019). Il en va de même pour les paliers et la garniture mécanique. Si lors de la mise en rotation de l'arbre le flux d'eau pompé est trop faible, ces pièces seront mal refroidies. Elles vont s'user plus rapidement. Un jeu et des vibrations risquent d'apparaître. La pivoterie risquera de se détériorer. Toutefois, la garniture mécanique n'assure sa fonction d'étanchéité que si la pivoterie est en bon état. Si elle est mal lubrifiée, elle peut casser. Alors, l'étanchéité est rompue, de l'eau peut se glisser dans le moteur créant un défaut d'isolement. C'est rare en forage (Martaud, 2019). Cela arrive parfois quand la pompe est démarrée suite à longue période d'arrêt (Deschamp, 2019).

Les recherches bibliographiques et les entretiens menés avec des professionnels ont permis de comprendre que le vieillissement prématuré des motopompes peut s'expliquer par différentes raisons. Il est influencé par la physico-chimie de l'eau, la qualité des matériaux et les conditions d'exploitation. Identifier la cause de la défaillance est donc une tâche difficile.

Les causes potentielles du vieillissement des pompes sont désormais connues. La prochaine étape est donc d'observer celles qui sont effectivement présentes sur les sites et équipements de la SEE.

2 État des lieux du patrimoine de la SEE

2.1 Rappel du contexte

2.1.1 Aperçu de l'état des pompes de la SEE

Les renouvellements de pompes sur les forages de la Société des Eaux de l'Est sont jugés trop fréquents. Entre 2007 et 2018, les pompes ont été changées en moyenne au bout de 3 ans passés dans un forage : cette durée de vie est bien inférieure à la moyenne de 10 ans (Van Holsteijn en Kemna BV and Viegand Maagøe A/S, 2018) indiquée par l'étude de la Commission Européenne et observée par des exploitants de SUEZ Eau France.

De plus, l'aspect des pompes lorsqu'elles sont déposées peut être assez impressionnant. Les illustrations ci-après (Figure 12) témoignent de la présence de biofilm avec des bactéries du fer et de particules solides dans le forage. Le moteur est lui aussi recouvert de dépôts.



Boue granuleuse d'une épaisseur de 1,5 cm présente tout autour du groupe motopompe



Encrassement du clapet de retenue par une boue orange



Encrassement et écrasement de la crépine d'aspiration



Vue du groupe motopompe entièrement recouvert de dépôts

Figure 12 : Photographies du groupe motopompe du forage 204 de la SEE sortie en mars 2019

2.1.2 Constats de l'étude de 2008

En 2008, des données ont été analysées concernant les causes d'interventions sur les forages entre 1991 et 2007. La Figure 13 en fait la synthèse. Elle a été actualisée avec les valeurs de 2008 à 2018.

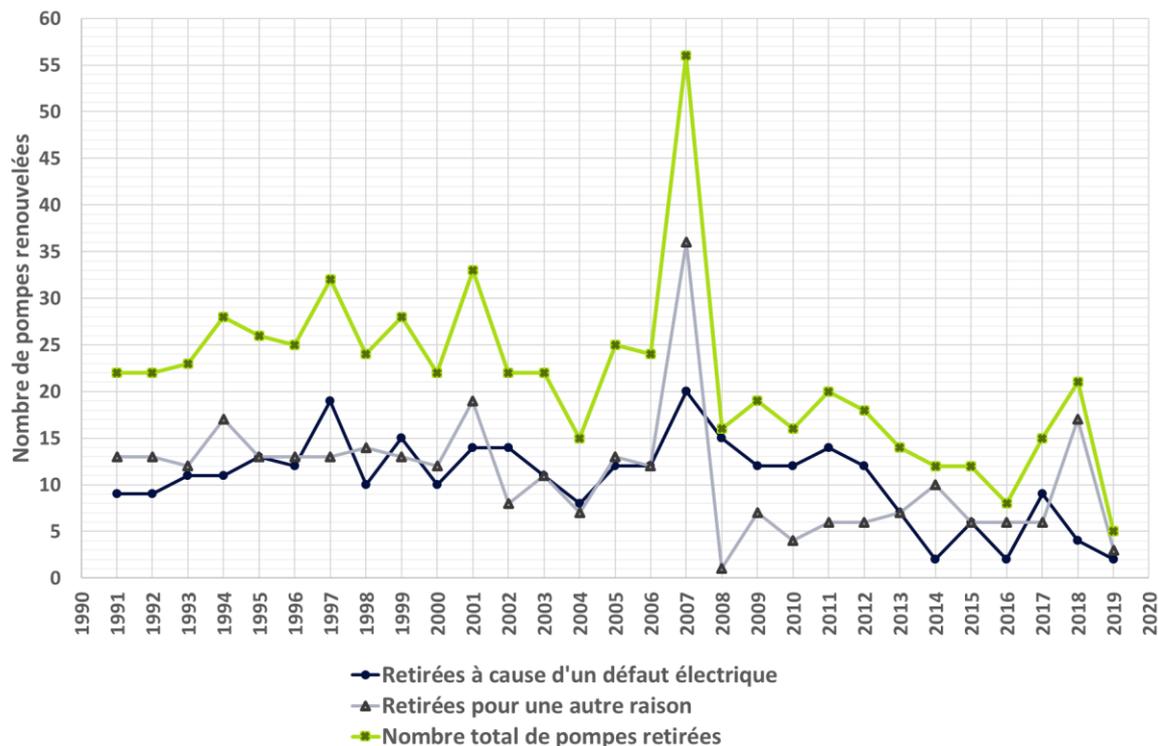


Figure 13 : Causes d'interventions annuelles sur les forages de la SEE entre 1991 et 2007 (archive SEE)

Avant 2007, 26 pompes étaient changées en moyenne chaque année sur le parc. En moyenne, 46 % des défauts constatés étaient des défauts électriques de motorisation. La tendance était constante entre 1991 et 2007. En 2007, il y a eu un changement de tension d'alimentation (passage de 500 à 400 V), d'où le pic de renouvellements. Depuis le changement de tension, le nombre de pompes renouvelées chaque année a diminué : il y a 15 pompes remplacées en moyenne chaque année.

Un travail de partenariat avec des fournisseurs de pompes avait été engagé à la fin de l'année 2007. Un protocole d'expertise avait été défini. Les nouveaux groupes motopompes posés et présentant un problème étaient décrits sur une fiche de diagnostic par les exploitants de la SEE, puis renvoyés au fabricant pour qu'il fasse une expertise du groupe en question (Annexe 10).

Toutefois, il ne reste que quelques documents disponibles concernant cette étude. Ils témoignent de la mise en place du protocole et de quelques pompes qui avaient été renvoyées au fournisseur. Il n'y a pas de trace écrite des conclusions de l'étude. Un témoignage d'anciens participants au projet indique que des pistes d'amélioration avaient été soulevées comme le surdimensionnement du moteur ou l'utilisation d'un moteur au bobinage renforcé. Sinon, il a été proposé de considérer les pompes comme étant un consommable : une fourniture facile à changer.

Parmi les documents retrouvés, il y a 8 compte-rendu d'expertise de motopompes réalisés par les fournisseurs. Les photographies illustrant certains de ces compte-rendu sont fournies en Annexe 11.

Ces diagnostics témoignent :

- De traces de corrosions sur certaines pompes,
- De la présence de nombreux dépôts sur et parfois au sein de la pompe, de la crépine d'aspiration et du clapet,
- Du noircissement du liquide de refroidissement d'un des moteurs,
- Du percement de la carcasse d'un moteur,
- De l'impact des particules solides : une pompe était laminée par du sable.

Ces diagnostics reflètent la forte exposition des pompes de la Société des Eaux de l'Est aux phénomènes de colmatage, corrosion et d'usure explicités dans la partie précédente.

2.2 Observation de l'historique des pompes de 2007 à 2019

2.2.1 Informations recueillies

À chaque fois qu'une motopompe est changée, une fiche nommée « fiche de révision de forage » (Annexe 12) est remplie. C'est grâce à cette fiche que les informations sur les motopompes ont pu être collectées. Elle indique notamment :

- La durée de fonctionnement avant la dépose,
- La cause identifiée de la dépose,
- Les références du fabricant pour le modèle de la pompe et du moteur posés.

Une base de données a été construite et a permis de réunir les informations concernant 259 pompes. Toutefois :

- 59 pompes sont actuellement en service
- 11 pompes ont été déposées sans que le nombre d'heures de fonctionnement ait été noté (et il n'est pas possible de le retrouver aujourd'hui)
- Pour 4 pompes le modèle du moteur n'a pas été retrouvé.

Ces 74 pompes ne sont donc pas exploitables. Ainsi, la base de données d'étude contient 185 individus.

Dans cette étude, la statistique illustrant la durée de vie des motopompes est le nombre d'heures de fonctionnement.

2.2.2 Analyse des informations

Depuis 2007, la durée de vie des groupes motopompes est en moyenne de 9 787 heures, et cela correspond à 3 ans de présence dans un forage (Tableau 2). Cependant, l'écart-type est grand. Un groupe de pompage a pu passer 12 ans dans un forage d'eau potable. Il a été changé au moment de la régénération du forage mais n'était pas hors service. L'essentiel des pompes (80,5 %) a eu une durée de vie inférieure à 15 000 h (Figure 14).

Tableau 2 : Statistiques sur la durée de fonctionnement des pompes et la durée de présence dans le forage

Grandeur	Moyenne	Ecart type	Min	Max
Nombre d'heures moyen (h)	9 787	7 359	0	41 054
Temps moyen passé dans le forage (an)	3,0	2,4	0	12

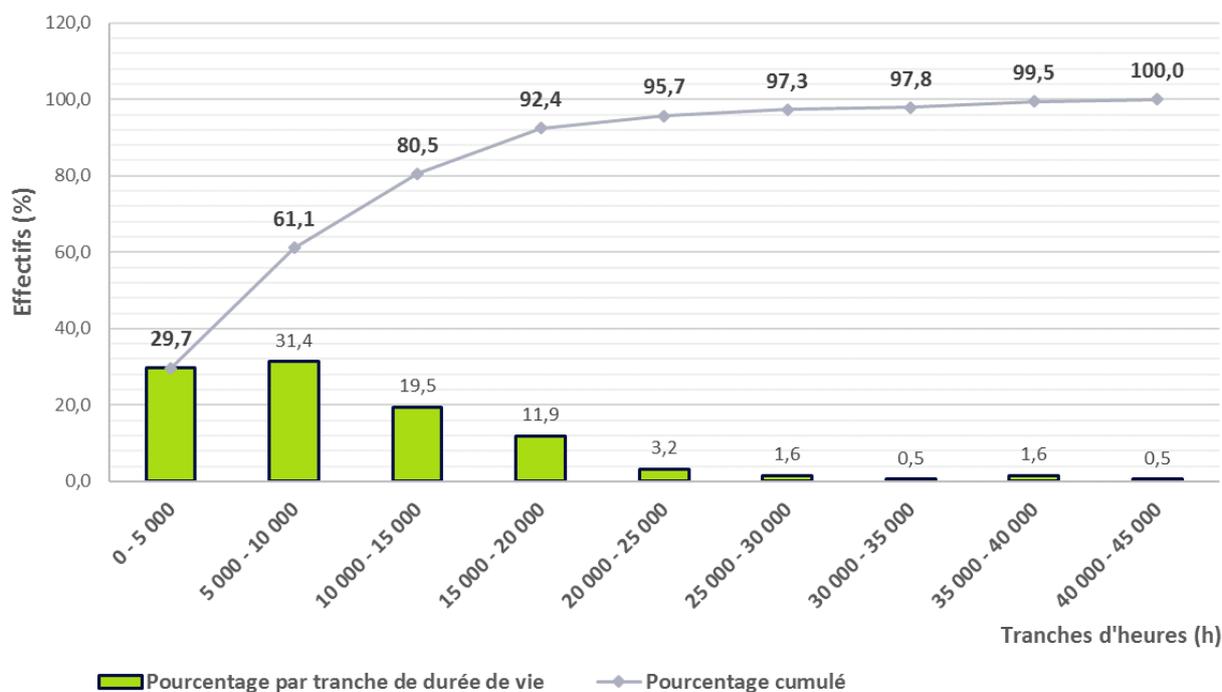


Figure 14 : Répartition par tranches d'heures de la durée de vie de fonctionnement des groupes motopompes avant leur dépose

Les causes de dépose des motopompes ont été scindées en 5 groupes (Figure 15) :

- Électrique : défaut d'isolement ou court-circuit,
- Maintenance générale du forage : régénération, regainage ou passage caméra,
- Manque de débit : potentiellement dû au vieillissement de la pompe,
- Mécanique : moteur bloqué, pompe percée, défaut de clapet ou aspiration du massif filtrant,
- Autre : fuite sur la colonne de refoulement, modification du réseau de distribution, ou raison inconnue.

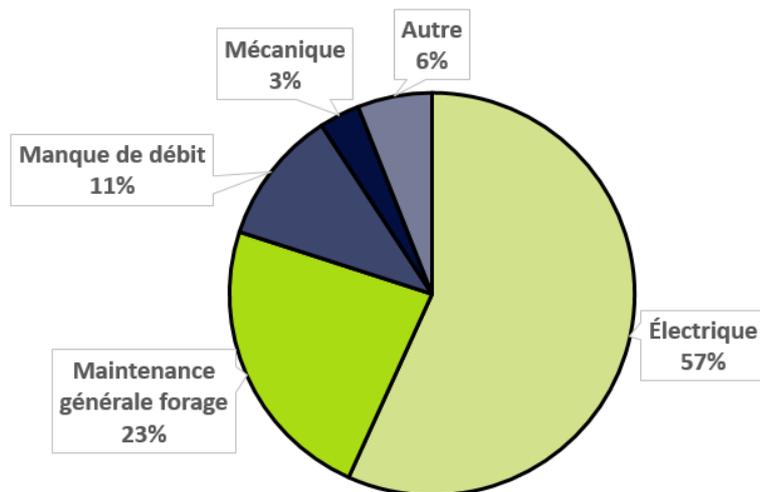


Figure 15 : Répartition des causes de dépose des 185 groupes motopompes étudiés

Entre 2007 et 2018, 57 % des pompes ont été déposées suite à un défaut électrique. Ce constat est similaire à celui réalisé une dizaine d'années plus tôt (Figure 13).

Entre 1991 et 2007, les défauts électriques occasionnaient l'arrêt des pompes après 7 000 h de marche en moyenne. Avec les autres défauts, les groupes motopompes tenaient en moyenne 14 000 h (SEE, 2008).

Depuis 2007, les défauts électriques apparaissent plus tardivement : en moyenne après 9 281 h de fonctionnement. Comme en témoigne Figure 16, l'âge moyen des pompes qui ont été changées en voulant profiter d'une opération de maintenance sur le forage (12 142 h) est plus élevé que pour les autres causes de dépose (moins de 10 000 h). Le choix de remplacer la motopompe à ce moment-là était donc cohérent avec la durée de vie à partir de laquelle un défaut électrique pouvait être attendu. Toutefois, ces motopompes auraient pu continuer de fonctionner plus longtemps. En effet, le nombre d'heures maximal de fonctionnement est de plus de 40 000 h (Tableau 2).

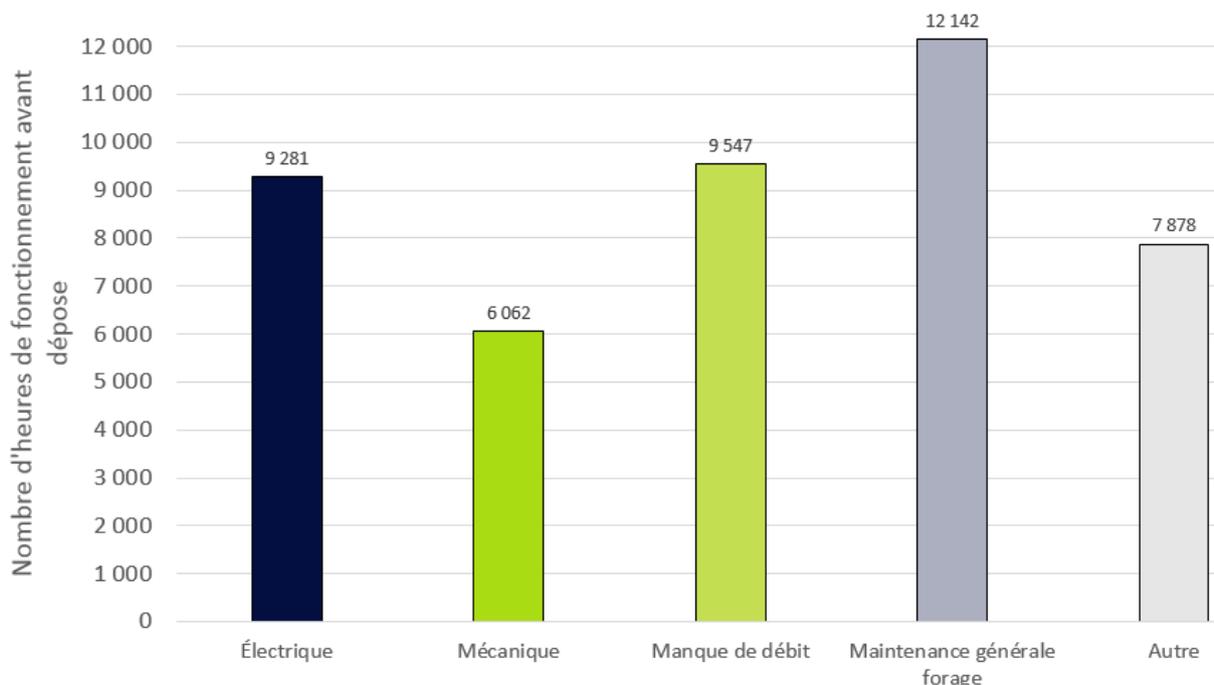


Figure 16 : Durée de vie moyenne des groupes motopompes en fonction de la cause de leur dépose

Au regard de ces commentaires, **l'analyse de l'influence des données quantitatives et qualitatives liées aux motopompes sur leur durée de fonctionnement** (Partie 3 du présent rapport) **a été réalisée uniquement sur les groupes motopompes déposés pour cause de défaut électrique**. Comme le signifiait la Figure 7 en début de rapport, les différentes causes de vieillissement des pompes peuvent ensuite conduire à un défaut électrique du moteur. C'est donc ce défaut-là qui illustre le plus fidèlement la durée de vie technique des motopompes. Et puisqu'il concerne 57 % des motopompes, le nombre d'individus n reste suffisamment élevé ($n=105$ motopompes, soit $n>30$) pour mener des études statistiques représentatives.

2.3 État des lieux sur le parc de forages

2.3.1 Informations recueillies

Les 65 forages de la SEE n'ont pas les mêmes caractéristiques. Certains ont une qualité d'eau meilleure que d'autres, certains sont plus âgés que les autres, etc. Ces paramètres pourraient influencer la durée de vie des pompes. Par exemple, une eau plus corrosive ou chargée en sables risque de plus rapidement user les pièces du groupe de pompage. Il est donc intéressant de synthétiser des informations sur ces sujets.

La SEE possédait déjà une base de données sur les forages, avec leur structure et les résultats d'analyses de qualité. Chaque forage fait l'objet d'au moins un prélèvement annuel, réalisé au mois de mars.

Des informations complémentaires ont pu être répertoriées grâce à la lecture de rapports de régénération, de réhabilitation, ou d'inspection des forages.

2.3.2 Analyse des informations

Comme le montre le Tableau 3, la conception des forages est assez variable, leur âge aussi. Certains d'entre eux n'ont encore jamais nécessité de maintenance, tandis que d'autres sont régénérés tous les 3 ans (fréquence de 0,33 maintenances par an) en moyenne.

Tableau 3 : Statistiques sur les forages - données quantitatives

Grandeur	Moyenne	Minimum	Maximum
Âge (ans)	35,6	5	103
Diamètre intérieur utile (mm)	328,5	225	600
Fréquence de maintenances (/an)	0,06	0	0,33

La Figure 17 (disponible à la page suivante) indique que :

- 83 % des forages ont une eau agressive ou corrosive ou à la fois agressive et corrosive,
- La majeure partie des forages a un tubage en acier (80 %) et une colonne de refoulement souple (88 %)

De plus, il semblerait que la conception des ouvrages n'a pas pris en compte ou n'a pas permis d'appliquer les meilleures pratiques. En effet, 22 % des forages captent deux nappes et dans 75 % des forages la pompe est placée au niveau des crépines. Pour rappel, le mélange d'eaux de natures différentes dans un forage peut stimuler les phénomènes de corrosion, la précipitation d'oxydes et donc le colmatage des équipements. Le mauvais positionnement de la pompe (c'est-à-dire au niveau des crépines du forage plutôt qu'au-dessus) augmente le risque de colmatage des équipements en attirant des particules solides depuis le massif filtrant. Aussi, le moteur est moins bien refroidi.

En termes de colmatage, la présence de sable a été révélée dans 23 % des forages.

Les bactéries sont aussi présentes :

- Soit sous forme de boue rouge (comme cela était visible sur la Figure 12) dans 18 % des forages,
- Soit sous forme d'un film visqueux et blanchâtre le long des parois, dans 11 % des forages.

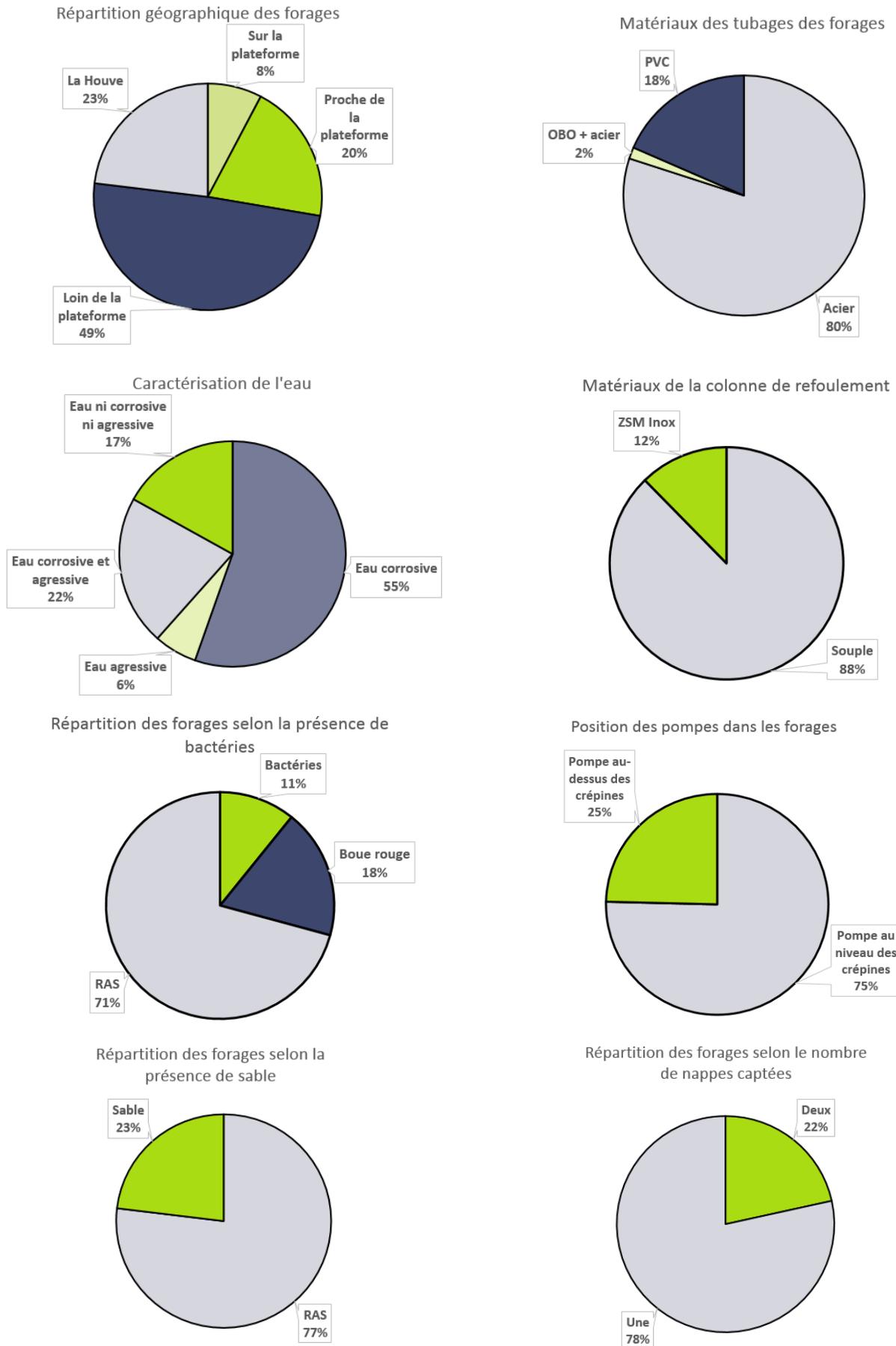


Figure 17 : Statistiques sur les forages - données qualitatives

3 Identification des causes de vieillissement des motopompes de la SEE

3.1 Méthode employée pour l'étude

3.1.1 Protocole global

Dans une analyse de vieillissement, il est conseillé de récolter des données concernant la structure des installations (ici les forages), les matériaux et dimensions des équipements (ici les motopompes), les conditions d'exploitation, l'historique des maintenances et des retours d'expériences (INERIS, 2009). C'est cette démarche qui a été entreprise (paragraphe 2.2.1 et 2.3.1).

L'avantage de la SEE est que les données liées aux groupes motopompes et aux forages ont été plutôt bien archivées et actualisées depuis la création des forages. Durant la réalisation de la présente étude des bases de données ont ainsi pu être complétées ou créées.

Parallèlement à cela, des fabricants de pompes ont été rencontrés, ainsi que des exploitants et acheteurs de pompes. Cela a permis de recueillir des retours d'expérience et des avis sur les solutions envisageables pour optimiser la durée de vie des pompes.

Afin de valoriser les données récoltées et de vérifier ou d'infirmer les prédictions des professionnels, une étude statistique a été menée. Toutefois, il faut garder à l'esprit que **cette étude est relative aux forages de la SEE et ne peut être généralisée sans prendre de précautions**. Tous les forages ne peuvent être comparés à ceux de la SEE.

L'étude statistique a été réalisée sur deux bases de données à savoir :

- 1) Un historique de motopompes de plus de dix ans. L'objectif étant d'étudier l'influence de la conception de la motopompe et de ses conditions de fonctionnement sur sa durée de vie.
- 2) Une base de données répertoriant les forages. Le but étant de voir l'influence des données de structure des forages et de qualité d'eau sur la durée de vie moyenne des motopompes qui ont été présentes dans chacun des forages.

La suite du rapport présente les données récoltées pour construire ces bases de données et la façon dont elles ont été analysées grâce à des tests statistiques.

3.1.2 Données récoltées

3.1.2.1 Données sur les groupes motopompes

L'objectif de la collecte de données sur les groupes motopompes est d'avoir les informations qui permettront de tester par la suite des corrélations entre le nombre d'heures de fonctionnement du groupe motopompe et :

- La conception du groupe motopompe (fabricant, matériaux, nombre de roues, etc.),
- Les conditions d'exploitation (bridage, jupe, variateur de fréquence, etc.),
- La cause de la dépose.

Une grande partie du temps voué à cette étude a été consacré à la constitution de la base de données sur les motopompes. Chaque groupe de pompage posé puis déposé (retiré du forage) à partir de 2007 a été recensé dans un tableau.

Le choix de faire débiter la base de données en 2007 s'explique par plusieurs arguments :

- En 2007, toutes les motopompes ont été remplacées pour respecter le changement de tension d'alimentation électrique (passage de 500 à 400 V) du parc de forages. Ainsi, la tension d'alimentation n'aura pas d'influence sur les données puisqu'elle est la même pour toutes les motopompes étudiées.
- 20 forages ont été créés en 2006 (dont 15 forages dans la zone dénommée « La Houve », loin de la plateforme industrielle (Annexe 1)) et certains ont été renouvelés. En démarrant la base de données en 2007, tous les forages sont étudiés sur une période de temps commune. Cela permet théoriquement d'avoir un nombre plus égalitaire de motopompes par forage dans l'historique. Sinon, il y aurait eu plus d'informations concernant les anciens forages.
- La base de données sur les forages de la SEE présente des données de qualité depuis 2007.

À partir des références des fabricants (inscrites sur la fiche remplie à chaque changement de pompe), des renseignements ont pu être extraits concernant le nombre de roues, les matériaux de différentes parties de la motopompe ou encore le diamètre du groupe motopompe.

Le tableau en Annexe 13 indique les données qui ont été collectées pour les 185 motopompes posées et déposées depuis 2007. La distinction entre données qualitative et quantitative explique les différentes analyses statistiques qui sont menées ensuite.

Le nombre de pompes ayant fonctionné en étant équipées d'une jupe de refroidissement ou d'un variateur de vitesse est trop faible. Ces deux conditions d'exploitation ne pourront donc pas être prises en compte dans l'étude statistique. Les données relatives à la conception des motopompes sont quant à elles exploitables.

3.1.2.2 Données sur les forages

L'Annexe 14 explicite les données qui ont été collectées concernant les forages.

La corrosivité et l'agressivité de l'eau des forages a été évaluée à partir de la méthode décrite à l'Annexe 5.

Des indices basés sur des intervalles de concentration ont été réalisés pour la teneur en fer et en manganèse (Annexe 15), chacun sur 5 points. En effet, l'eau est pompée dans la nappe des Grès du Trias inférieur (GTi). Cette eau est réputée riche en fer et en manganèse (AERM, 2002), avec des teneurs dépassant les références de qualité en eau potable⁶.

Un score global de qualité d'eau (note sur 12 points, Équation 3) a été calculé. Il est la somme des 4 indices évoqués précédemment. De la même façon, un score sur l'état du forage (sur 3 points, Équation 4) a été calculé. Il dépend du nombre de nappes captées (0 si une nappe, et 1 si deux nappes sont captées), de la présence de biofilm (0 si absent et 1 si présence constatée) et de la présence attestée de sables dans l'eau à partir d'un certain débit de pompage (0 si absents, 1 si présents).

Plus les scores et indices sont proches de 0, plus la conception du forage ou la qualité de l'eau sont bonnes.

Équation 3 : Calcul du score global de qualité

$$\text{Score qualité (/12)} = \text{indice corrosivité} + \text{indice agressivité} + \text{indice Manganèse} + \text{indice Fer}$$

⁶ Les références de qualité des eaux destinées à la consommation sont de 200 µg Fe/L pour le fer et 50 µg Mn/L pour le manganèse et sont fixées par l'Arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine.

Équation 4 : Calcul du score global de l'état du forage

$$\text{Score état (/3)} = \text{indice nombre nappes captées} + \text{indice biofilm} + \text{indice sable}$$

Afin d'étudier l'influence des forages sur la durée de vie des motopompes, chaque forage est associé à la durée de vie moyenne de toutes les motopompes qui ont été posées et déposées en son sein. Ainsi les 185 motopompes sont ici prises en compte. Toutefois, la fréquence des causes de dépose a été calculée pour chaque forage. Pour cela, des regroupements ont été faits entre les causes de dépose et trois fréquences sont calculées :

- La fréquence de dépose liée à un **défaut électrique**
- La fréquence de dépose liée à de l'**usure** : manque de débit ou problème mécanique,
- La fréquence de dépose liée à un **choix d'exploitation** : maintenance sur le forage ou modification des conditions d'exploitation.

3.1.3 Méthode d'analyse des données

Des tests ont été réalisés avec le logiciel Tanagra ® (version 1.4.50). La Figure 18 synthétise la démarche d'exploitation statistique des données récoltées.

Pour les données quantitatives, le logiciel a permis de procéder à des tests de corrélation et à des statistiques exploratoires (Classification Hiérarchique Ascendante CAH et Analyse en Composantes Principales : ACP) afin de voir ce qui distingue ou caractérise des groupes d'individus.

Une fois ces descriptions effectuées, il a été possible d'affiner l'étude des paramètres influençant la durée de vie des motopompes. Pour les données quantitatives, c'est de nouveau un test de corrélation qui a été mené. Pour les données qualitatives, des tests de normalité et d'équivalence ont été réalisés afin de vérifier qu'une ANOVA (analyse de la variance) était possible. Sinon, c'est un test du Khi^2 , plus robuste, qui était mené.

Des rappels sur l'utilisation et l'interprétation de ces méthodes et tests statistiques sont disponibles en Annexe 16.

Données quantitatives

- **Statistiques exploratoires**
 - **Test de corrélations croisées**
Corrélation si $p\text{-value} < 0,1$.
Sens de la corrélation dépend du signe du coefficient r .
 - **Classification hiérarchique ascendante (CAH)**
 - **Analyse en composantes principales (ACP)**
- **Test de corrélation avec le nombre d’heures de fonctionnement**

Données qualitatives

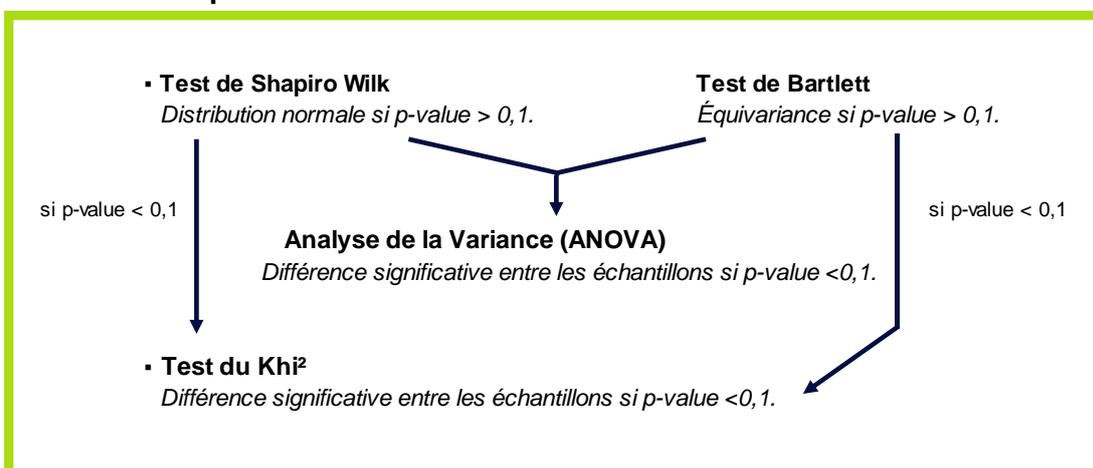


Figure 18 : Schéma de la méthode d’exploitation et d’interprétation des données

3.2 Résultats de l’analyse statistique des causes de vieillissement des groupes immergés

3.2.1 Synthèse des statistiques menées sur les motopompes

3.2.1.1 Statistiques exploratoires sur les motopompes

Pour rappel : les tests suivants ont été effectués uniquement sur les 105 motopompes dont la cause de dépose est un défaut électrique.

Certaines grandeurs sont liées entre elles. L’étude de leurs corrélations permet de réduire le nombre de données traitées. Suite aux tests de corrélations croisées effectués (Annexe 17), seuls les paramètres indiqués dans la colonne de gauche du Tableau 4 ont été conservés.

Tableau 4 : Choix des paramètres conservés pour la CAH

Paramètre conservé	Paramètre(s) positivement corrélé(s) abandonnés
Année de fabrication de la pompe	Année de fabrication du moteur Année de pose
Puissance du moteur	Débit du point de fonctionnement optimal Débit à la mise en service HMT du point de fonctionnement optimal Diamètre du moteur Vitesse estimée de circulation de l'eau autour du moteur
Nombre d'heures de fonctionnement	Durée de présence dans le forage
Nombre d'années passées en stock	-
Nombre de roues	-

La Classification Hiérarchique Ascendante aboutit à 3 classes. Leur caractérisation (Annexe 18) fait ressortir les points suivants :

- La **classe 1** comprend 34 motopompes dont la **puissance** était en général **élevée** et le nombre de roues faible par rapport aux autres pompes,
- La **classe 2** contient 23 motopompes. Celles-ci sont des motopompes de **faible puissance** et plutôt **récentes** (fabriquées en 2013 en moyenne), qui n'ont pas passé de temps en stock et qui ont fonctionné peu de temps par rapport à la population générale,
La **classe 3** est composée de 48 motopompes, de **faible puissance**, ayant passé en moyenne un an en stock. Ces pompes sont plus **anciennes** (fabriquées en 2006 en moyenne).

L'Analyse en Composantes Principales permet d'obtenir 2 axes qui portent 61,1 % de l'information (Annexe 19). Cela s'illustre sur le graphique plan factoriel (Figure 19). Il permet de placer les individus en fonction de leur position sur les deux axes principaux.

Le tableau des corrélations des axes principaux avec les paramètres étudiés (Annexe 20) permet de constater que :

- L'axe principal 1 condense l'information sur le nombre d'années passées en stock, le nombre d'heures de fonctionnement et le nombre de roues (sens croissant) et l'information sur l'année de fabrication (sens décroissant : alors les pompes sur la droite du graphique sont globalement plus anciennes que celles sur la gauche).
- L'axe principal 2 porte les informations relatives au nombre de roues (sens croissant) et sur la puissance du moteur (sens décroissant de l'axe).

Les motopompes de la SEE peuvent être regroupées en 3 classes. Elles se distinguent principalement par leur année de fabrication et leur puissance (inversement corrélée au nombre de roues).

Sur la période étudiée dans l'historique, le nombre d'heures de fonctionnement avant l'apparition d'un défaut électrique a été plus faible pour les pompes plus récentes. En effet, les motopompes de la classe 2 de la CAH, ont été en moyenne fabriquées en 2013 et ont fonctionné 5 783 h alors que globalement, les motopompes de l'historique ont été fabriquées en moyenne en 2008 et ont fonctionné 9 281 h.

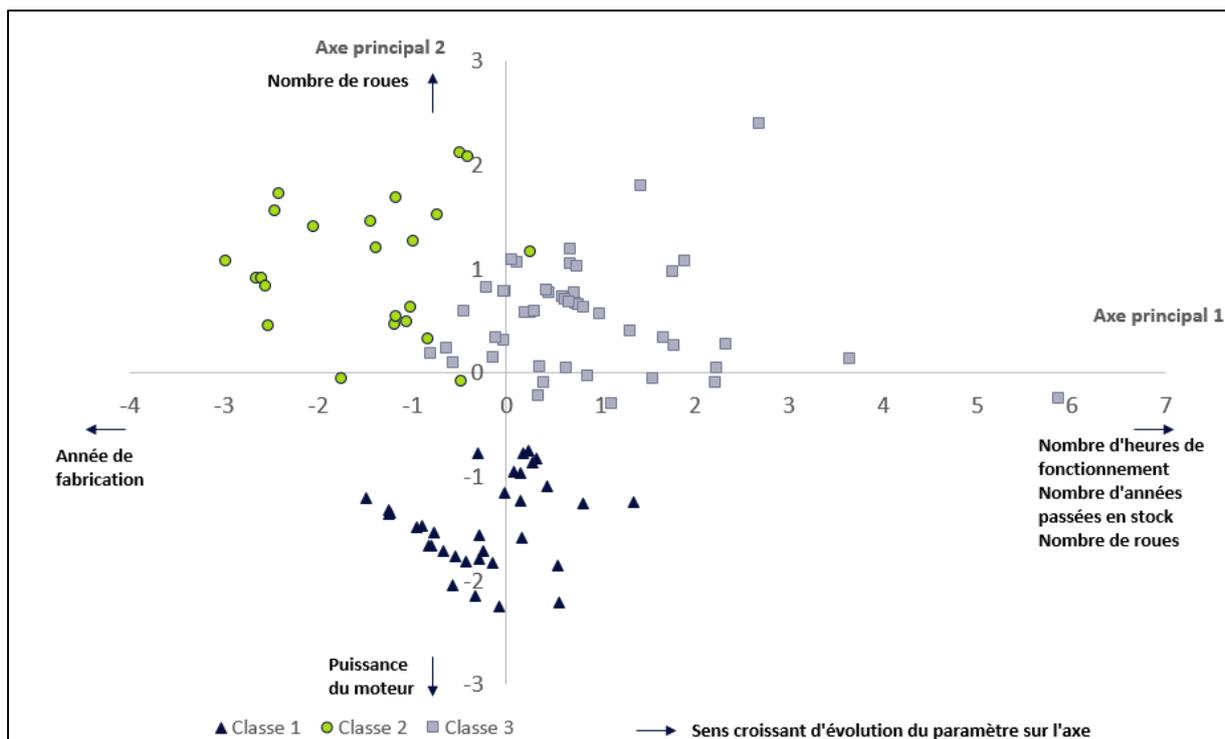


Figure 19 : Visualisation des classes de motopompes sur le plan factoriel

3.2.1.2 Influence des paramètres quantitatifs sur la durée de vie des motopompes

Les tests de corrélations croisées précédemment réalisés (Annexe 17) étaient voués à diminuer le nombre de variables lorsqu'il y avait des redondances pour la CAH. Il est possible d'étudier plus précisément les grandeurs qui sont corrélées au nombre d'heures de fonctionnement des motopompes avant l'occurrence d'un défaut électrique. Alors, le **nombre d'heures de fonctionnement** est :

- Inversement corrélé à **l'année de fabrication de la pompe** ($r = -0,2257$; $P(> |t|) = 0,0206$) et du moteur ($r = -0,2381$; $P(> |t|) = 0,0145$) ainsi qu'à l'année de pose ($r = -0,2016$; $P(> |t|) = 0,0392$),
- Positivement corrélé au **temps passé dans le forage** ($r = 0,5972$; $P(> |t|) = 0,0000$),
- Positivement corrélé au **nombre de roues** ($r = 0,2457$; $P(> |t|) = 0,0115$).

Pour tous les autres paramètres (puissance, débit, et HMT au point de fonctionnement idéal, diamètre du moteur, etc.), il n'y a pas de corrélation mise en évidence ici ($P(> |t|) > 0,10$).

Concernant l'influence de l'année de fabrication des pompes, une explication pourrait être que la qualité de fabrication des motopompes diminue depuis 10 ans. Cela semble peu probable. Une autre hypothèse est cette fois-ci liée aux fabricants avec qui la SEE a travaillé en fonction des années. La prédominance des constructeurs de pompes sur le parc de forages a varié selon les époques. Avant 2007 il y a eu des pompes Pleuger et KSB (mais ce constructeur ne figure pas dans la base de données étudiée). Entre 2007 et 2010, il y avait principalement des pompes de Grundfos et Pleuger. Puis en 2010 les premières pompes Caprari de la SEE ont été achetées et posées dans les forages au détriment des pompes Pleuger (qui n'ont plus été achetées depuis 2014). Si le constructeur a une influence sur la durée de vie, cette explication pourrait se confirmer.

Les anciennes motopompes de la SEE avaient en moyenne une durée de vie plus importante que les motopompes plus récentes. De plus, il existe une corrélation positive entre le nombre de roues et le nombre d'heures de fonctionnement avant l'occurrence d'un défaut électrique.

3.2.1.3 Influence des paramètres qualitatifs sur la durée de vie des motopompes

3.2.1.3.1 Méthode employée

Pour étudier l'influence des données qualitatives sur la durée de vie des pompes, une vérification de la normalité et de l'équivariance a été menée pour voir si une analyse de la variance (ANOVA) était possible.

La normalité n'est pas vérifiée pour la distribution du nombre d'heures de fonctionnement sur la population globale. En effet, le test de Shapiro-Wilk aboutit à $p - value = 0 \%$ (or il faut une $p - value > 10 \%$ pour vérifier la normalité). De plus, l'équivariance n'est pas vérifiée pour tous les facteurs de classification.

Un test du Khi^2 a donc été réalisé. Il a été effectué sur des classes : différentes tranches de nombre d'heures de fonctionnement.

Les données ont été scindées en 3 tranches :

- Une tranche de 0 à 5 000 h de fonctionnement,
- Une tranche de 5 000 à 10 000 h de fonctionnement,
- Une tranche pour les motopompes qui ont fonctionné plus de 10 000 h.

Ces tranches ont été fixées de façon à respecter au mieux la condition d'effectif théorique égal à 5 (explication du calcul de l'effectif théorique Annexe 21).

3.2.1.3.2 Résultats obtenus

Comme le montre le Tableau 5 ci-après, le test du Khi^2 indique que le constructeur de la pompe et du moteur a une influence sur la durée de vie des pompes. De plus, des éléments de conception de la motopompe comme le matériau des bagues d'usure, des chemises de moteur et des butées moteur ont une influence significative sur la durée de vie des motopompes au regard du test effectué.

Tableau 5 : Synthèse des résultats obtenus pour les motopompes avec le test du Khi^2

Facteur de classification	Nombre de variantes	Effectifs théoriques toujours > 5 ?	p-value	Conclusion du test du Khi^2 sur les motopompes
Constructeur pompe	3	Oui	0,0001	Influence
Gamme pompe	5	Non	0,0004	Possible influence mais on ne peut pas conclure
Constructeur moteur	4	Oui	0,0007	Influence
Gamme modèle moteur	6	Non	0,0009	Possible influence mais on ne peut pas conclure
Etat à l'installation	2	Non	0,6919	On ne peut pas conclure
Bridage	2	Oui	0,7783	Pas d'influence
Matériau roue	3	Non	0,0113	Possible influence mais on ne peut pas conclure
Corps de pompe	2	Oui	0,2215	Pas d'influence
Matériau bague usure pompe	3	Oui	0,0001	Influence
Matériau coussinets pompe	4	Non	0,0003	Possible influence mais on ne peut pas conclure
Matériau chemise moteur	2	Oui	0,000	Influence
Garniture mécanique	2	Oui	0,2215	Pas d'influence
Matériau butée moteur	5	Non	0,0003	Possible influence mais on ne peut pas conclure
Matériau bobinage	4	Non	0,0006	Possible influence mais on ne peut pas conclure
Bobinage renforcé	2	Oui	0,2137	Pas d'influence

Le détail des tests est fourni en Annexe 22. Il peut être analysé en comparant les effectifs réels aux objectifs théoriques. Un exemple d'interprétation est détaillé ci-après pour la Figure 20. Les effectifs réels sont présentés sur la gauche de la figure, et les effectifs théoriques, à droite.

Constructeur de la pompe	Effectifs réels par tranches d'heures			Effectif total
	0 - 5 000 h	5 000 - 10 000 h	> 10 000 h	
GRUNDFOS	9	12	16	37
PLEUGER	14	18	20	52
CAPRARI	14	0	2	16
Effectif total	37	30	38	105

Constructeur de la pompe	Effectifs théoriques par tranches d'heures			Effectif total
	0 - 5 000 h	5 000 - 10 000 h	> 10 000 h	
GRUNDFOS	13	11	13	37
PLEUGER	18	15	19	52
CAPRARI	6	5	6	16
Effectif total	37	30	38	105

Figure 20 : Exemple de comparaison des effectifs réels et théoriques pour le test du χ^2 sur le constructeur de la pompe

Concernant les constructeurs de pompes, la répartition des effectifs réels dans les tranches est conforme à la répartition attendue pour les constructeurs Grundfos et Pleuger. Elle est parfois même légèrement plus favorable que la répartition théorique. Pour le constructeur Caprari cependant, il y a de 2,3 fois plus de pompes dans la tranche « 0 – 5 000 h » que prévu. La durée de vie des pompes Caprari est donc significativement plus faible que celle des pompes des autres fabricants. Il en va de même pour les moteurs. Les effectifs des constructeurs Pleuger, Grundfos et Franklin au sein des tranches sont proches des valeurs théoriques quand ceux de Caprari plus défavorables (Annexe 22).

Toutefois, le nombre de données pour le fabricant Caprari est inférieur à celui des autres constructeurs (16 pompes Caprari contre 37 pompes Grundfos et 52 pompes Pleuger). **Les résultats des données relatives à Caprari sont alors moins robustes que pour Grundfos et Pleuger.**

La potentielle influence des produits de Caprari sur la durée de vie des motopompes se reflète dans les analyses sur les matériaux. Pour certaines pièces, un matériau correspond à un seul fabricant (facilement identifiable au travers des effectifs). C'est notamment le cas pour les bagues d'usure, les coussinets et la butée.

Lorsque les bagues d'usure sont en inox et caoutchouc (comme dans les pompes Caprari), la motopompe a une durée de vie significativement plus faible que quand les bagues d'usure sont en NBR⁷ ou en Fonte et Nickel (comme chez Grundfos et Pleuger).

Les motopompes avec une chemise moteur en acier inoxydable (Grundfos) ont une durée de vie plus élevée que celle attendue, et les motopompes avec une chemise en fonte (Pleuger et Caprari) ont une durée de vie plus faible que celle attendue avec les effectifs théoriques.

D'autres paramètres n'ont pas d'influence (au seuil de risque de 10 %). Il s'agit :

- Du bridage,
- Du matériau du corps de pompe,
- De la garniture mécanique,
- Du bridage renforcé.

Pour l'état de la motopompe à son installation (neuve ou pas), la *p – value* est supérieure à 10 %, toutefois, la condition d'effectif théorique supérieur ou égal à 5 n'a pas pu être respectée. Il n'est pas possible de conclure de façon rigoureuse, mais l'état à l'installation ne semble pas avoir d'influence sur la durée de vie de la motopompe.

Pour certains facteurs, la *p – value* était inférieure à 10 %, toutefois la condition d'effectif théorique supérieur ou égal à 5 n'a pas pu être respectée. Alors, il n'est pas possible de tirer de conclusion de façon rigoureuse. Cependant, cela laisse deviner des tendances intéressantes qui pourraient se confirmer ou s'infirmer si la même étude était faite dans quelques années avec les futures pompes

⁷ NBR : caoutchouc nitrile ou copolymères butadiène-acrylonitrile.

remplacées : c'est-à-dire lorsque les effectifs seront suffisants pour conclure. Les facteurs ayant potentiellement une influence sont la gamme de pompe, la gamme de moteur, le matériau de la roue, les coussinets de pompe, le matériau de la butée et l'isolant des bobinages.

Pour la gamme de pompe :

- Les produits du fabricant Pleuger (gamme PN et QN) ont tendance à respecter de façon assez fidèle les effectifs théoriques. La gamme QN semble même être un bon produit. Les 2 pompes de la gamme QN ont duré plus de 15 000 h. Seule la conception des roues (nombre d'aubes et diamètre différencient les gammes PN et QN).
- Les produits du fabricant Grundfos (gamme SP) se répartissent parfois de façon plus favorable que ce qui était attendu avec les effectifs théoriques.
- Les motopompes Caprari de la gamme E.P. sont toutes dans la tranche « 0 – 5 000 h » et dans la classe 2 de la CAH. Celles de la gamme E.S. se répartissent dans les trois classes de la CAH et dans les tranches « 0 – 5 000 h » et « plus de 15 000 h ». La gamme E.P. est la motopompe classique de Caprari. La gamme E.S. est « particulièrement adaptée au relevage d'eau contenant du sable » (Caprari, 2013).

Concernant la gamme de moteur :

- Pour les moteurs utilisés avec les pompes de Pleuger (gamme M et MH) ou avec les pompes Grundfos (moteurs du fabricant Franklin ou les gammes MMS ou MS de moteurs Grundfos), les répartitions sont fidèles à la répartition théorique.
- Pour Caprari, une seule gamme est étudiée et est principalement répartie dans la tranche « 0 – 5 000 h ».

Pour le matériau de la roue :

- Les 6 pompes équipées de roues en fonte ont eu une durée de vie inférieure à 5 000 h. Elles provenaient aussi de chez Caprari et sont toutes dans la classe 2 de la CAH.
- La répartition des effectifs pour les roues en bronze respecte totalement la répartition théorique.
- Pour les roues en inox, les effectifs réels sont plus favorables que les effectifs théoriques (il y a plus de pompes qu'espéré dans les tranches supérieures à 5 000 h).

À propos des coussinets (paliers lisses) :

- Les pompes construites avec des coussinets en acier inoxydable ou caoutchouc ont une durée de vie plus faible que celle attendue théoriquement. Les 10 pompes concernées sont dans la tranche « 0 – 5 000 h ». Ce matériau est utilisé par Caprari dans sa gamme de pompes E.P. Dans sa gamme E.S., il utilise des coussinets en bronze.
- Grundfos utilise du NBR et Pleuger un autre polymère.

Concernant la butée axiale : les moteurs avec une butée en composé synthétique associé à de l'acier inoxydable ou du laiton (Caprari) ont une durée de vie plus faible que les moteurs équipés de butée en acier inoxydable ou CER-CARB⁸ (Grundfos), en graphite (Franklin) ou en matériau « AF » (de Pleuger).

Enfin, pour ce qui concerne l'isolant des bobinages :

- Les 9 motopompes équipées d'isolant en composite HT ont eu une durée de vie inférieure à 5 000 h et se trouvent dans la classe 2 de la CAH.
- Pour les autres isolants (cuivre vernis, PVC et PE²+PA) les effectifs réels sont proches des effectifs théoriques.

⁸ CER-CARB : carbure de céramique.

- L'utilisation d'un bobinage renforcé (PE²+PA) n'a pas d'influence significative sur la durée de vie des motopompes ici. Le cuivre verni et le PVC semblent aussi performants.

3.2.1.4 Synthèse et perspectives

D'après les analyses statistiques, plus le nombre de roues est élevé et plus la puissance du moteur est faible, plus les groupes motopompes ont une durée de vie plus élevée.

L'étude a montré que les motopompes plus récentes (classe 2 de la CAH, motopompes fabriquées en moyenne en 2013) avaient une durée de vie significativement plus faible que la moyenne globale (5 783 h contre 9 281 h). Cela est potentiellement dû au fait que la SEE a travaillé avec différents fournisseurs en fonction des années. En effet, le test du Khi² indique que le fabricant a une influence sur la durée de vie des pompes. D'après les données de l'historique, les motopompes d'un fabricant avec qui la SEE travaille depuis 2010 ont eu une durée de vie significativement plus faible que les motopompes des autres fabricants testés sur la période 2007-2019. Il est difficile d'expliquer ce qui cause cette durée de vie plus faible sur les motopompes de ce fabricant mais une des différences entre les constructeurs réside dans les matériaux utilisés pour certaines pièces.

Toutefois, le résultat indiquant l'influence du fabricant en question sur la durée de vie des motopompes peut être biaisé par le fait que l'historique contient moins de motopompes de ce fabricant que des autres constructeurs. Les données sont moins robustes. De plus, de nombreux paramètres peuvent influencer la durée de vie des motopompes et toutes les données n'ont pas été testées les unes par rapport aux autres. Si les motopompes de ce fabricant ont été généralement utilisées dans des forages dont l'eau est de mauvaise qualité cela aurait pu avoir une influence. Or, cela n'a pas été étudié pompe par pompe.

Une partie des résultats de l'étude n'est pas exploitable en l'état car les calculs étaient parfois menés sur des effectifs réduits. Si l'historique est tenu à jour et que l'étude est reproduite dans les années à venir, les effectifs seront peut-être suffisants pour confirmer ou infirmer les tendances qui se dégagent.

Parmi ces tendances, il est à noter que les motopompes avec des roues en fonte ou avec un bobinage isolé avec le composite HT ont une durée de vie qui semble plus faible que pour des motopompes avec des roues en bronze ou en acier inoxydable ou des bobinages en PVC, PE²+PA ou cuivre vernis.

3.2.2 Synthèse des statistiques menées sur les forages

3.2.2.1 Statistiques exploratoires sur les forages

La Classification Hiérarchique Ascendante (CAH) permet d'obtenir trois classes distinctes. Leur caractérisation est détaillée en Annexe 24 et indique les éléments suivants :

- La classe 1 est composée de 11 forages dont la **qualité est plutôt mauvaise** (score de qualité moyen de 9,5/12). **Les remplacements sont principalement dus à l'usure**. Ces forages sont assez **fortement sollicités** (en moyenne 5 527 h de fonctionnement par année de présence dans le forage, contre 3 555 h en général). Dans tous ces forages l'aspiration de la pompe est face aux crépines du forage.

- La classe 2 contient 25 forages. Ceux-ci sont **plutôt âgés** (en moyenne 56 ans). Ils ont un **nombre de démarrages important** (92 démarrages par mois pour la classe 2 contre 55 en général) et leur score d'**état** est supérieur à celui des autres classes (1,20/3 en moyenne contre 0,74/3 sur l'ensemble des forages). Ainsi, ces forages présentent soit du biofilm, soit du sable ou captent deux nappes. Cependant, leur qualité d'eau est plutôt bonne en comparaison avec les forages de la classe 1 (score de 5/12). **Les remplacements de pompes dans ces forages sont principalement dus à des défauts électriques.** Dans tous ces forages l'aspiration de la pompe est face aux crépines du forage.
- La classe 3 regroupe 29 forages. Ces derniers sont plutôt **jeunes** (16 ans en moyenne). En effet, cette classe contient les 15 forages de la Houve (créés en 2006), auxquels s'ajoutent des forages plus anciens. Ces forages sont en bon état (score de 0,34/3) et la **qualité de l'eau** qu'ils captent également plutôt bonne (score de 5/12 en moyenne). La motopompe a le plus souvent une bonne position dans le forage. **Les remplacements de motopompes dans ces forages sont principalement dus à des choix d'exploitation.**

Les trois classes de forages ne se distinguent pas par la durée de vie moyenne de leurs motopompes mais plutôt par la cause de dépose la plus fréquente.

L'Analyse en Composantes Principales aboutit à l'obtention de 2 axes principaux portant 60,6 % de l'information (tableau de l'inertie cumulée et tableau des corrélations des axes principaux en Annexe 25 et Annexe 26). Le plan factoriel suivant (Figure 21) illustre la disposition des forages en fonction de leur classe.

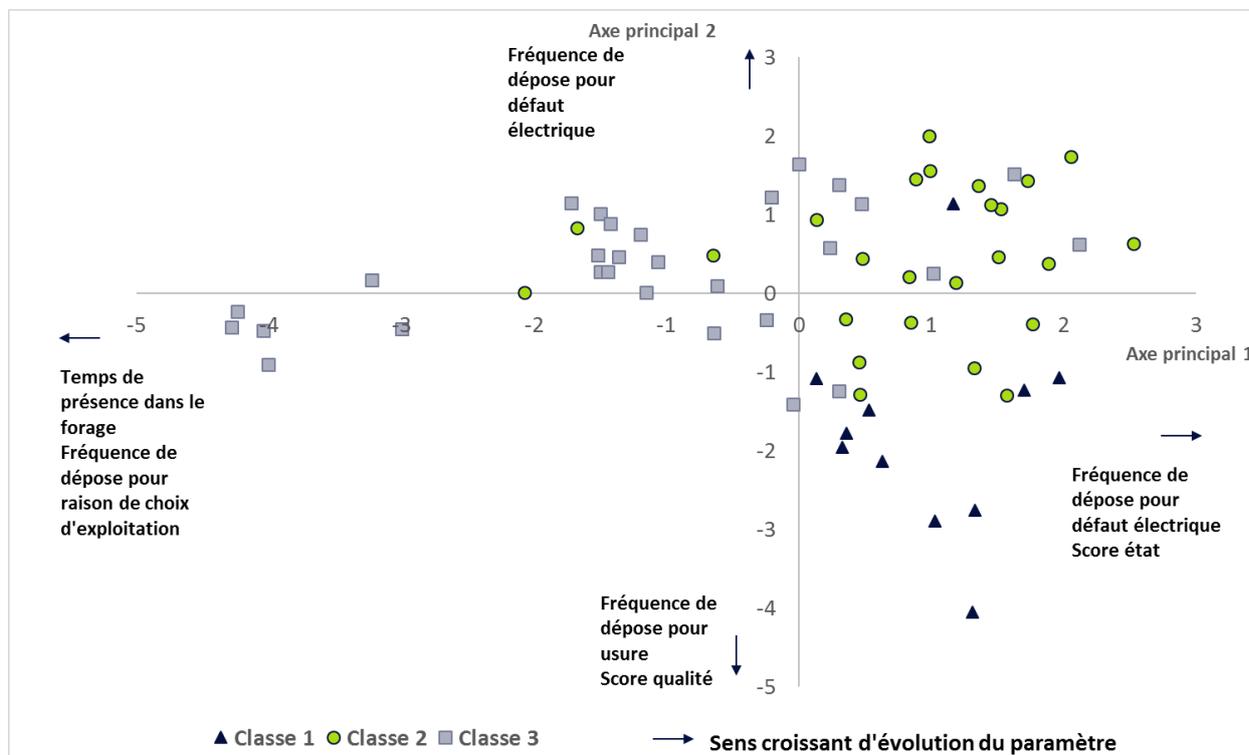


Figure 21 : Visualisation des forages sur le plan factoriel

3.2.2.2 Influence des paramètres quantitatifs des forages sur la durée de vie des motopompes

Les tests de corrélations entre la durée de vie moyenne des motopompes de chaque forage et les données quantitatives liées aux forages (Annexe 23) indique que le **nombre d'heures de fonctionnement d'une motopompe** avant remplacement est :

- Positivement corrélé à la **durée moyenne d'un cycle de marche**⁹ ($r = 0,3467$; $P(> |t|) = 0,0047$),
- Positivement corrélé à la **durée moyenne pendant laquelle les motopompes sont présentes dans le forage** ($r = 0,2438$; $P(> |t|) = 0,0504$),
- Positivement corrélé à la **durée moyenne annuelle de fonctionnement** ($r = 0,2528$; $P(> |t|) = 0,0422$),
- Positivement corrélé à **l'âge du forage** ($r = 0,2635$; $P(> |t|) = 0,0203$),
- Inversement corrélé la **fréquence des maintenances** ($r = - 0,2419$; $P(> |t|) = 0,0523$),
- Inversement corrélé au **score de qualité** ($r = - 0,2178$; $P(> |t|) = 0,0813$).

3.2.2.3 Influence des paramètres qualitatifs des forages sur la durée de vie des motopompes

Les durées de vie moyennes des motopompes dans les forages ne suivent pas une distribution normale (le test de Shapiro-Wilk aboutit à $p - value = 0 \%$). Ainsi, c'est le test du Chi^2 qui est utilisé pour l'étude des données qualitatives.

Tableau 6 : Synthèse des résultats obtenus pour les forages avec le test du Chi^2

Facteur de classification	Nombre de variantes	Effectifs théoriques toujours > 5 ?	p-value	Conclusion du test du Chi^2 sur les forages
Secteur géographique	4	Non	0,0322	Possible influence mais on ne peut pas conclure
Matériau colonne de refoulement	2	Non	0,0622	Possible influence mais on ne peut pas conclure
Matériau tubage	3	Oui	0,0408	Influence
Position de l'aspiration de la pompe par rapport au sommet des crépines du forage	2	Oui	0,0708	Influence
Présence de sable ?	2	Oui	0,7838	Pas d'influence
Présence de biofilm ?	2	Oui	0,9190	Pas d'influence
Capte deux nappes ?	2	Oui	0,5300	Pas d'influence
Corrosivité	2	Oui	0,0396	Influence
Agressivité	2	Oui	0,8904	Pas d'influence

Les résultats détaillés sont fournis en Annexe 27

⁹ C'est le nombre d'heures de fonctionnement moyen suite à un démarrage de la pompe du forage. Il a été estimé par échantillonnage. Il a été calculé en divisant la durée de fonctionnement moyenne des forages par le nombre de démarrages sur la même période. Cela a été extrapolé à partir des bilans mensuels des forages de janvier et juillet de 2015 à 2019. Ce paramètre peut être mis en parallèle avec la durée de rabattement de la nappe (plusieurs minutes). Pendant le rabattement, la pompe ne fonctionne pas toujours dans la plage recommandée.

Deux tranches de durée de vie ont été définies :

- Une de 0 à 8 000 h de fonctionnement en moyenne,
- Une de plus de 8 000 h de fonctionnement en moyenne.

D'après le test du χ^2 le matériau du tubage, la position de la motopompe dans le forage et la corrosivité de l'eau ont une influence significative ($p - \text{value} < 10\%$) sur la durée de vie des équipements électriques (Tableau 6). Les principales conclusions sont que :

- La durée de vie des motopompes est plus élevée dans les forages en PVC et plus faible dans les forages tubés en acier que ce qui était attendu par les effectifs théoriques. Pour rappel, le PVC est inerte vis-à-vis de la corrosion, contrairement à l'acier.
- Pour les pompes au niveau des crépines, la durée de fonctionnement avant dépose est plus élevée que prévu, ce qui semble contradictoire. Cela peut s'expliquer par la sollicitation des puits. En effet, les forages anciens sont ceux qui sont les plus sollicités mais ils ont une conception moins bonne que celle des puits créés en 2006.
- Une eau non corrosive augmente la durée de vie de la motopompe. En effet, les effectifs réels pour l'eau non corrosive sont répartis de façon plus favorable que ce qui était attendu par les effectifs théoriques.

D'après ce test, la présence de sable, de biofilm ou le fait que le forage capte deux nappes n'ont pas d'influence significative sur la durée de vie des pompes. L'agressivité de l'eau n'en aurait pas non plus.

Concernant le secteur géographique et le matériau de la colonne de refoulement, la condition d'effectif minimum de 5 n'est pas respectée. Il n'est pas possible de conclure à une influence significative.

3.2.2.4 Synthèse

La CAH a permis d'identifier 3 groupes de forages pour lesquels la cause de dépose des pompes est différente. Cela peut s'expliquer par la qualité de l'eau mais aussi par la façon dont l'approvisionnement en eau est géré avec des forages prioritaires, d'autres en soutien, etc.

D'après les tests de corrélation, le nombre d'heures de fonctionnement augmente pour les forages anciens. Toutefois, cela est biaisé par la faible sollicitation des forages récents dans lesquels les groupes de pompage immergés sont généralement remplacés en profitant d'une opération de maintenance alors qu'ils auraient pu encore fonctionner.

Un autre constat permis par les tests de corrélation est que plus une motopompe fonctionne longtemps après avoir démarré, plus sa durée de vie est importante. Il semble alors préférable d'avoir peu de forages mais assez fortement sollicités plutôt que beaucoup de forages dont certains sont sollicités pour une faible durée.

Enfin, plus le score de qualité est mauvais (proche de 12/12), plus la durée de vie des motopompes diminue et les remplacements sont alors principalement dus à l'usure (Classe 1 de la CAH).

Globalement, la durée de vie moyenne des motopompes est plus élevée dans les forages avec un tubage en PVC (10 658 h) plutôt qu'en acier (9 703 h) ou dans les ouvrages dont l'eau est non corrosive (12 420 h) par rapport à ceux dont l'eau est corrosive (9 117 h).

Les résultats concernant l'influence de la position de la pompe par rapport aux crépines du forage sur la durée de vie des pompes sont contradictoires. Cependant, les forages les plus récents sont les forages les mieux conçus (en termes de position de pompe) et sont aussi les forages les moins sollicités. En effet, les forages de la classe 3 de la CAH (âgés de 16 ans en

moyenne) fonctionnent en moyenne 2 237 h par an contre 4 217 h pour les forages de la classe 2 de la CAH (âgés de 56 ans en moyenne).

Certains paramètres comme l'utilisation d'une jupe de refroidissement n'ont pas pu être testés par manque de pompes présentant ce critère dans l'historique de la SEE.

Les recherches bibliographiques avaient indiqué des paramètres influençant la durée de vie des pompes et des pistes d'amélioration pour l'allonger. L'analyse statistique menée dans cette étude n'a pas toujours pu confirmer l'efficacité de ces pistes.

Toutefois les recherches sur le vieillissement des pompes et les résultats de l'état des lieux du patrimoine de la SEE et de l'étude statistique sont utiles pour proposer des pistes pour optimiser la durée de vie des pompes. En effet, certaines conditions d'exploitation peuvent être améliorées ainsi que le choix des motopompes au moment de leur achat.

4 Optimisation de la durée de vie des groupes motopompes

4.1 Axes pour optimiser la durée de vie des pompes de forages

4.1.1 Identification des facteurs sur lesquels il est possible d'agir

Les recherches bibliographiques ont permis de comprendre le vieillissement des motopompes de forages. Ce dernier dépend de nombreux facteurs relatifs :

- À la qualité de l'eau pompée (corrosive ou non, chargée en fer, tendance au colmatage, etc.),
- À la conception de l'ouvrage de prélèvement (matériaux, diamètre, position du sommet des crépines),
- Aux conditions d'exploitation (durée moyenne d'un cycle de fonctionnement, etc.),
- Au groupe de pompage immergé lui-même.

Il n'est pas envisageable de modifier la qualité de l'eau ou le forage (sauf en recourant à un rechemisage). **Toutefois, il est possible d'améliorer les conditions d'exploitation et le choix de la motopompe.**

4.1.2 Pistes d'améliorations pour les conditions d'exploitation

4.1.2.1 Analyse fonctionnelle du système de pompage

Durant l'étude il est apparu que le point de fonctionnement réel des motopompes n'était pas toujours bien connu.

Parmi les 65 forages, 23 sont intégrés dans l'outil Well Watch ®. Cet outil permet de suivre en continu les performances du forage et de la motopompe grâce à des mesures de paramètres électriques, de niveau d'eau, de pression au refoulement et de débit. Il permet de représenter le vieillissement du forage ou de la pompe dans le temps. Un point de service est estimé en fonctionnement stabilisé (niveau dynamique constant). À ce jour, il n'y a pas d'étude montrant la variation du point de service au moment du démarrage de la pompe. Un premier aperçu des données montre que le rabatement peut durer plus de 10 minutes. Alors, sur cette durée, il faudrait vérifier que le point de fonctionnement se situe bien dans la plage étroite (80 - 110 % autour du point de fonctionnement optimal). Si ce n'est pas le cas, le groupe de pompage risque de vieillir prématurément (Paragraphe 1.2.3.3.3).

De plus, certains forages sont liés aux autres. En effet, s'ils refoulent l'eau pompée dans la même canalisation, les forages peuvent s'influencer mutuellement. Cette situation a été identifiée à plusieurs reprises, comme sur le groupe de forages F204, F206, F207 et F242 (Annexe 28). Lorsqu'une pompe démarre alors qu'une autre était déjà en fonctionnement, le débit de la première diminue. Ces influences entre forages induisent donc plusieurs points de service réels pour un même forage. Si tous ces points ne sont pas dans la plage de débit étroite, le vieillissement de la pompe pourra là aussi apparaître de façon prématurée.

Le fonctionnement des forages de la SEE est régi par un outil nommé Sevaqua ®. Ce dernier contient les asservissements (en fonction du niveau d'eau dans des réservoirs et des prévisions de consommations fournies par les industriels) et des priorités de pompage (selon la qualité de l'eau, les obligations de l'arrêté préfectoral, etc.). Il faudrait analyser son contenu en détail pour comprendre comment le système de pompage de la SEE fonctionne.

4.1.2.2 Ajustement des débits d'exploitation

Depuis une dizaine d'années, la demande en eau des industriels diminue. Il est donc possible de songer à diminuer les débits désirés des pompes qui seront achetées et à les faire fonctionner plus longtemps. En effet, l'analyse statistique tendait à montrer que les pompes des forages les plus sollicitées étaient changées après un nombre d'heures de fonctionnement plus élevé que dans les forages moins sollicités (en termes de durée de pompage). De la même façon, il serait envisageable d'abandonner des forages et de solliciter plus longtemps les forages conservés.

Cependant, suite aux régénérations qu'ils font sur les forages, les prestataires rendent un rapport indiquant le débit maximum d'exploitation du forage. Ce débit maximum est fixé en identifiant le débit de pompage à partir duquel la productivité du forage diminue fortement. Il conviendrait de vérifier que les pompes ne dépassent pas ce débit maximum. S'il est dépassé et que la motopompe n'est pourtant pas utilisée sur des durées longues, il faudrait étudier la possibilité d'utiliser une motopompe avec un point de fonctionnement optimal dont le débit est plus faible, et de la faire tourner plus longtemps.

4.1.2.3 Amélioration de la position de la pompe

La Figure 17 indique que dans 75 % des forages, l'aspiration de la pompe est placée au niveau des crépines du forage. Bien que les tests du Khi^2 n'ont pas montré d'influence de la position de la pompe sur sa durée de vie, les recherches bibliographiques expliquent que cela a deux effets négatifs :

- Des particules solides du massif filtrant peuvent être attirées, favorisant le colmatage,
- Le bon refroidissement du moteur n'est pas assuré car l'eau ne s'écoule pas directement autour de lui pour évacuer la chaleur.

Il est envisageable, lors des opérations de maintenance, d'étudier le raccourcissement de la colonne d'exhaure. Cela a été fait en 2019 sur le forage F209. La colonne d'exhaure, souple, a été écourtée afin que la pompe soit placée au-dessus du sommet des crépines du forage.

Ainsi, il existe des pistes d'améliorations des conditions d'exploitation. Pour mieux diagnostiquer les causes de vieillissement des pompes il faudrait connaître de façon plus précise leurs conditions de fonctionnement. En effet, les pompes n'ont pas un point de fonctionnement fixe, mais un intervalle de points de services. Ces points sont à ce jour mal connus. Il est donc difficile de savoir si les pompes fonctionnent sur une plage de débit optimale.

Pour certains forages, une diminution du débit d'exploitation pourrait permettre de réduire le colmatage et donc l'usure de la pompe. De plus, si la pompe est sollicitée plus longtemps mais à un plus faible débit, sa durée de vie pourrait augmenter.

Enfin, il est possible d'améliorer la conception du système de pompage en réduisant la longueur de la colonne d'exhaure. Cela permettrait de remonter la pompe, potentiellement au-dessus du sommet des crépines. Le refroidissement du moteur serait alors amélioré.

Au-delà de l'amélioration des conditions d'exploitation pour optimiser la durée de vie des motopompes, il est possible de mieux les choisir lors de l'achat. La partie suivante présente la façon dont les motopompes sont actuellement choisies et indique les propositions d'optimisation prises en compte pour l'année 2019.

4.1.3 Pistes d'amélioration pour le choix des motopompes

4.1.3.1 Procédure actuelle

4.1.3.1.1 Choix des pompes à renouveler

La SEE consulte les fabricants une fois par an afin d'obtenir des devis pour les pompes d'une série de forages qu'elle a choisie.

La SEE a une obligation de priorisation de pompage sur certains forages, fixée par arrêté préfectoral. Pour ces forages la SEE s'assure d'avoir toujours une pompe en stock en cas de panne. Si ce n'est pas le cas, elle en commande une.

Pour les autres forages, l'exploitant a aussi parfois des pompes en stock adaptées à plusieurs forages. Parfois, le vieillissement de la motopompe est suivi sous l'outil Well Watch ®. Le besoin de renouvellement peut ainsi être anticipé. Lorsque le rendement d'une pompe a baissé de façon importante, une pompe de remplacement est commandée.

4.1.3.1.2 Détermination du point de service désiré

Afin d'obtenir des devis, plusieurs fournisseurs sont contactés et une fiche de renseignements sur le forage et les conditions d'exploitation de la future pompe leur est fournie (Annexe 29).

Cette fiche présente notamment le débit et la HMT attendus au point de service désiré. Les fournisseurs proposent des pompes dont le point de fonctionnement idéal se rapproche du point de service attendu.

Ce point de service est défini par l'exploitant. Actuellement, les pompes sont remplacées en observant le point de fonctionnement idéal de l'ancienne pompe en place et en étudiant le vieillissement du forage (via le rabattement) pour vérifier s'il y a besoin d'une plus grande HMT. Comme cela a été évoqué précédemment, les motopompes peuvent avoir plusieurs points de fonctionnement, mal identifiés par la SEE.

4.1.3.1.3 Procédure d'achat

Dans le groupe SUEZ, l'achat des motopompes d'une puissance supérieure à 25 kW est soumis à une procédure particulière. Un tableau comparatif doit être rempli en partenariat avec le service Achats (le tableau est illustré en Annexe 30). Il renseigne les paramètres techniques de la motopompe proposée par chaque fournisseur. Il estime le coût de l'énergie électrique annuelle facturée pour la pompe si elle prélève 1 000 m³/j et qu'elle fonctionne à son point de rendement optimal. Ainsi, la somme des coûts d'investissements et d'exploitation peuvent être comparés. C'est le coût à 5 ans qui est généralement observé pour les pompes en eaux industrielles de la SEE.

En 2019, des propositions d'amélioration ont été prises en compte.

4.1.3.2 Consultation pour l'achat des motopompes à renouveler en 2019

4.1.3.2.1 Analyse préliminaire des offres

En 2019, une consultation a été lancée pour 11 forages sélectionnés par l'exploitant.

Quatre fabricants ont été consultés, ils sont respectivement surnommés fabricant A, B, C et D dans la suite de l'étude.

Une première analyse des offres permet de dégager des tendances dans les propositions des différents fournisseurs (Tableau 7).

Tableau 7 : Tendances des propositions commerciales en fonction des fabricants

Fournisseur	Corps de pompe	Roues	Proposition de jupe	Isolant du bobinage
A	Fonte	Bronze	Jamais	« Green wire »
B	Inox	Inox	Systématiquement	Fil vernis, PVC ou PE ² +PA en fonction des forages
C	Standard	Fonte	Composite	PVC
	Tout inox	Inox	Inox	PVC
D	Inox	Inox	Systématiquement	PVC

Pour les propositions du fabricant B, l'isolant du bobinage n'est pas toujours le même. C'est le seul fournisseur à proposer un bobinage renforcé (PE²+PA) parmi les offres reçues.

Le fabricant C propose ici deux constructions différentes : une dite « tout inox » avec le corps et les roues en acier inoxydable et une autre dite « standard » en fonte avec les roues en composite. Les roues en composite n'ont pas encore été testées sur les forages de la SEE.

Certains fabricants proposent systématiquement une jupe, d'autres n'en proposent jamais. Il n'y a pas de justification fournie avec la proposition de la jupe.

4.1.3.2.2 Critères de sélection choisis

Lors de l'analyse des offres le tableau comparatif (Annexe 30) est rempli. Les critères de décision habituels sont :

- La consommation énergétique spécifique (kWh/m³),
- Le prix à l'achat,
- Le coût global sur 5 ans (achat de la pompe et consommation d'énergie pour une production de 1 000 m³/j),
- Le délai de livraison,
- La vérification du point de fonctionnement.

Il a été suggéré de tester différentes technologies et différents fabricants afin d'enrichir l'expérience de la SEE de cas variés. Il s'agit de comparer :

- L'isolant du bobinage pour un même constructeur,
- Les différentes constructions ou gammes chez un même fabricant,
- L'influence de l'utilisation d'une jupe sur deux forages de même diamètre équipés d'une motopompe similaire.

Bien sûr, faire des tests comparatifs comme ceux-là sur le nombre d'heures de fonctionnement de la motopompe avant l'occurrence d'un défaut électrique ne permettra pas de tirer des conclusions définitives puisque de nombreux paramètres influencent la durée de vie des motopompes. Toutefois, il est toujours intéressant d'observer les phénomènes, même de façon empirique. Ces motopompes, une fois déposées, pourront être renseignées dans l'historique de pompes et intégrées aux statistiques.

4.1.3.2.3 Perspectives d'amélioration de la procédure de consultation

Le tableau comparatif du service Achats est un bon outil d'aide à la décision. Cependant, une limite est que le coût global est estimé pour une production de 1 000 m³/j pour tous les forages alors qu'ils ne sont pas tous sollicités de la même façon. De plus, le choix est fait en regardant le cumul des coûts après 5 ans, or, la présente étude a permis de mettre en évidence que la durée de vie des motopompes est significativement influencée par le fabricant et qu'elle est en moyenne de 3 ans.

La SEE souhaite disposer d'un outil d'aide à la décision permettant d'estimer la durée de vie des pompes qui lui sont proposées en prenant en compte les retours d'expérience pour affiner le calcul du coût global et de l'amortissement.

4.2 Outil d'aide à la décision

4.2.1 Principe de l'outil d'aide à la décision attendu

L'outil d'aide à la décision du service des Achats de SUEZ Eau France permet une analyse technico-économique rapide et synthétique lors de la procédure de consultation pour les achats de pompes. Toutefois, la Société des Eaux de l'Est souhaite avoir un outil qui permette un calcul plus fin de l'amortissement. L'objectif principal est de pouvoir choisir la motopompe la mieux adaptée au forage parmi celles proposées par les fournisseurs. L'outil doit être simple, robuste et actualisable.

Afin de ne pas créer un nouvel outil indépendant, l'outil du service Achats a été complété.

Le premier objectif de l'outil est d'estimer **la durée de vie probable des motopompes proposées en fonction des forages**. Il convient donc de prendre en compte des paramètres de vieillissement quantifiables ou qualifiables sur les forages et sur les motopompes.

4.2.2 Méthode d'estimation de la durée de vie des motopompes et de l'amortissement

La durée de vie des motopompes est ici estimée en fonction de 8 variables (Tableau 8). Pour chaque possibilité (par exemple roues en bronze ou roues en acier inoxydable ou roues en fonte), la durée de vie moyenne des motopompes de l'historique qui correspondent est associée. La durée de vie estimée de la motopompe proposée pour le forage concerné est alors la moyenne de la durée de vie attendu pour chacune de ces variables (Équation 5).

Tableau 8 : Variables prises en compte pour estimer la durée de vie des motopompes

Élément (base de données)	Variable	Nombre de possibilités	Méthode de calcul
Motopompe (défaut électrique)	Gamme pompe	5	Durée de vie moyenne de la gamme
	Gamme moteur	6	Durée de vie moyenne de la gamme
	Matériau roue	3	Durée de vie moyenne avec ce matériau
	Bobinage	4	Durée de vie moyenne avec ce matériau
	Nombre de roues	-	Fonction affine
Forage (toutes causes de dépose)	Corrosivité	2	Durée de vie moyenne des motopompes dans les forages dont l'eau est corrosive ou non
	Matériau du tubage	2	Durée de vie moyenne des motopompes ayant fonctionné dans un forage avec ce matériau de tubage
	Forage	65	Durée de vie moyenne des motopompes de ce forage

Équation 5 : Détermination de la durée de vie moyenne des motopompes

$$\bar{D}(\text{motopompe, forage}) = \frac{\bar{D}(\text{gamme de pompe}) + \bar{D}(\text{gamme de moteur}) + \bar{D}(\text{matériau roue})}{8} + \frac{\bar{D}(\text{nombre de roues}) + \bar{D}(\text{matériau de l'isolant du bobinage}) + \bar{D}(\text{corrosivité}) + \bar{D}(\text{tubage}) + \bar{D}(\text{forage})}{8}$$

Avec :

- $\bar{D}(\text{motopompe, forage})$, la durée de vie estimée en fonction des données de la motopompe proposée par le fournisseur et en fonction du forage auquel elle est vouée, en heures de fonctionnement,
- $\bar{D}(X)$, la durée de vie moyenne des motopompes selon la valeur du paramètre X , en heures de fonctionnement.

L'outil offre une possibilité pour pondérer les variables.

La durée de vie estimée est ensuite convertie en années pour obtenir la durée d'amortissement D_{amort} (Équation 6).

Équation 6 : Calcul de la durée d'amortissement

$$D_{\text{amort}} = \frac{\bar{D}(\text{motopompe, forage})}{D_{\text{fctt jour}} \times 365}$$

Avec, $D_{\text{fctt jour}}$, la durée de fonctionnement journalière de la motopompe (en h/j), calculée comme le montre l'Équation 7.

Équation 7 : Calcul de la durée de fonctionnement journalière

$$D_{\text{fctt jour}} = \frac{V_{\text{jour produit}}}{Q_{\text{optimal}}}$$

Avec :

- $V_{\text{jour produit}}$, le volume moyen journalier produit par le forage sur un historique de 2007 à 2018 ($\text{m}^3 \cdot \text{j}^{-1}$),
- Q_{optimal} , le débit au point de fonctionnement proposé par le fournisseur ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$).

Enfin, l'amortissement annuel peut alors être calculé en ramenant le coût global sur la durée d'amortissement (Équation 8 et 8).

Équation 8 : Calcul de du coût global

$$\text{Coût global} = \text{Coût d'investissement initial} + \text{Coût annuel de l'énergie} \times D_{\text{amort}}$$

Équation 9 : Calcul de l'amortissement

$$\text{Amortissement annuel} = \frac{\text{Coût global}}{D_{\text{amort}}}$$

4.2.3 Avantages de l'outil personnalisé pour la SEE

Dans l'outil du service Achats ainsi complété (Annexe 31), un menu déroulant permet de choisir le forage concerné par l'offre. Des données sur le forage sont alors automatiquement récupérées comme :

- Le volume journalier prélevé issu de l'historique : afin d'affiner le calcul du coût énergétique annuel pour chaque forage,
- La corrosivité et la durée de vie moyenne des pompes qui avaient été posées et déposées dans le forage entre 2007 et 2019 : pour intégrer l'estimation de la durée de vie des pompes,
- La constitution du forage : diamètre du forage et position de la pompe par rapport aux crépines pour étudier l'utilité de la jupe de refroidissement (explication ci-après),
- Le coût du démontage et remontage du forage (coût de main-d'œuvre et de location de matériel selon le matériau de la colonne d'exhaure et le besoin de louer une grue si un palan n'est pas présent).

Les fournisseurs ne justifiaient pas leur proposition de jupe. Un calcul a été ajouté à l'outil d'aide à la décision afin de vérifier l'utilité et la faisabilité de l'installation d'une jupe en tenant compte :

- De la marge entre le diamètre de la jupe et celui du forage, souhaité supérieur à 50 mm pour pouvoir permettre l'installation de la jupe dans le forage,
- De la vitesse théorique d'écoulement moyen autour du moteur sans jupe : si elle est déjà supérieure à la valeur de référence ($0,3 \text{ m.s}^{-1}$) l'utilisation de la jupe n'est pas justifiée (sauf si la pompe est placée au niveau des crépines du forage),
- De la vitesse théorique d'écoulement moyen autour du moteur avec jupe : pour vérifier que la jupe a été correctement dimensionnée par le fabricant : c'est-à-dire qu'elle permet bien d'obtenir une vitesse moyenne d'écoulement supérieur à $0,3 \text{ m.s}^{-1}$.

4.2.4 Étude de fiabilité du modèle

Le calcul de la durée de vie estimée des motopompes peut être modifié en prenant plus ou moins en compte l'influence de certaines variables. Un test a été réalisé pour identifier la variable qui, lorsqu'elle est plus prise en compte que les autres, permet d'obtenir un résultat plus proche de la réalité.

Pour cela, l'outil a été essayé sur les 185 motopompes de l'historique. L'écart entre la durée de vie estimée et la durée de vie réellement observée a été calculé. Puis, les coefficients de pondération affectés aux variables ont été modifiés. L'évolution de la somme des carrés des écarts (SCE) qui en résulte permet de voir quelle configuration permet de réduire les écarts (Annexe 32).

Finalement, c'est en affectant un coefficient de pondération plus élevé à la variable de durée de vie moyenne des motopompes dans le forage que l'outil est plus fiable (en lui affectant un coefficient 2, la SCE diminue de 7,6%). Dans un second temps, le paramètre lié au nombre de roues permet aussi de réduire l'écart (en lui affectant un coefficient 2, la SCE diminue de 2,1%).

Plus ces deux critères sont pris en compte par rapport aux autres, plus la somme des carrés des écarts diminue.

Conclusion

L'objectif de la présente étude était de trouver des solutions pour optimiser la durée de vie des motopompes de forages à la Société des Eaux de l'Est.

Des recherches bibliographiques et des entretiens avec des professionnels ont permis de comprendre les phénomènes de vieillissement des pompes. Le vieillissement est un phénomène normal mais qui peut être accéléré par la corrosion, le colmatage, l'abrasion ou des phénomènes mécaniques (coup de bélier ou cavitation). De plus, de mauvaises conditions d'exploitation peuvent être en cause lorsqu'elles n'assurent pas le bon refroidissement du moteur ou la lubrification des pièces de pivoterie ou d'étanchéité de la pompe.

Un état des lieux du patrimoine de la SEE a montré que les motopompes sont changées à cause d'un défaut électrique dans 57 % des cas (en moyenne après 9 281 h de fonctionnement).

L'état des lieux a permis de mettre en évidence la présence de situations défavorables pour la longévité des motopompes comme la présence de sable dans 23 % des forages, le mauvais positionnement de la motopompe par rapport aux crépines du tubage dans 75 % d'entre eux, le pompage d'eaux corrosives dans 77 % des ouvrages, etc.

Une analyse statistique a été menée sur l'historique des motopompes utilisées par la SEE depuis 2007 afin d'identifier quels paramètres liés à la conception de la motopompe, à la qualité de l'eau ou à la conception du forage ont une influence significative sur leur durée de vie.

L'étude a notamment révélé une corrélation positive entre le nombre de roues et la durée de vie des motopompes. De plus, le fabricant de la motopompe aurait une influence sur la durée de vie de celle-ci. Cela peut être lié à la différence des matériaux utilisés par chaque constructeur. Cependant, il faut garder à l'esprit que l'étude statistique a été menée sur un nombre de données limité, et que de nombreux paramètres peuvent avoir une influence. Si toutes les motopompes de ce constructeur ont été placées dans des forages qui ont tendance à rapidement user les motopompes, cela peut biaiser l'analyse statistique.

Contrairement à ce qui était attendu, l'utilisation de moteurs avec un bobinage renforcé n'a pas eu d'impact significatif sur la durée de vie des motopompes de la SEE. Enfin, plus la qualité de l'eau du forage est bonne et plus celui-ci est sollicité, plus la durée de vie de la motopompe est importante.

Les pratiques recommandées dans la littérature et les résultats des analyses statistiques ont pu être pris en compte pour proposer des pistes d'amélioration à la SEE. Une meilleure connaissance des points de service réels des pompes est nécessaire.

L'outil d'aide à la décision du service Achats de SUEZ Eau France a pu être complété afin de faciliter et d'affiner les choix de motopompes dès leur acquisition. Il permet d'estimer la durée de vie des motopompes, de calculer un coût global et son amortissement annuel. De plus, l'outil permet d'étudier l'utilité de l'utilisation d'une jupe.

Bibliographie

- AERM. 2002.** Atlas hydrogéologique du bassin Rhin Meuse. *Grès du Trias inférieur (GTI)*. Octobre 2002. Agence de l'Eau Rhin Meuse.
- AFNOR. 2008.** NF EN 60085. *Isolation électrique : Évaluation et désignation thermiques*. mai 2008. Association française de normalisation.
- . **2013.** NF EN 60216. *Matériaux isolants électriques - Propriétés d'endurance thermique*. Novembre 2013. Association française de normalisation.
- API. 2010.** ISO 13709:2009. 11th *Centrifugal pumps for petroleum, petrochemical and natural gas industries*. September 2010. American Petroleum Institute.
- ASM International. 2003.** Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection. *ASM Handbook*. 9ème éd. . 2003, Vol. 13. American Society for Metals.
- ASTEE. 2005.** *Les stations de pompage d'eau*. 6ème éd. Paris : Lavoisier, 2005. Association scientifique et technique pour l'eau et l'environnement, Rapinat, Michel (dir.), Tanini, Paul (coord.).
- BRGM; Greffart, J.; Moniton L. 1969.** Les données de l'analyse des eaux. Orléans : s.n., Septembre 1969. p. 21. Bureau de recherches géologiques et minières. 69 SGL 200 HYD.
- Caprari. 2013.** Electropompes Immergées 6"-22". [Documentation commerciale]. 2013. 996137D / 10-17.
- Castany, G. et Margat, J. 1977.** *Dictionnaire français d'hydrogéologie*. s.l. : Editions du BRGM, 1977.
- CEI. 2014.** CEI 60505. 3ème éd. *Évaluation et qualification des systèmes d'isolation électrique*. Octobre 2014. Commission Électrotechnique Internationale.
- Creus, Juan, Sabot, René et Refait, Philippe. 2013.** Corrosion et protection des métaux en milieu marin. 10 décembre 2013. COR620 V2.
- Crolet, Jean-Louis et Béranger, Gérard. 1998.** Corrosion en milieux aqueux des métaux et alliages. *Techniques de l'ingénieur*. 10 Juin 1998, pp. 1-21.
- Dagbert, Catherine. 2009.** Biocorrosion. *Techniques de l'ingénieur*. 10 Décembre 2009.
- Delorme, Lucien. 2019.** Entretien concernant la durée de vie des pompes de forages. 9 avril 2019. Communication personnelle.
- Deschamp, Karine. 2019.** Entretien avec Karine DESCHAMP (directrice technique du SNECOREP) concernant le vieillissement des pompes de forages. 20 juin 2019. Communication personnelle.
- Detay, Michel. 1993.** *Le forage d'eau. Réalisation, entretien, réhabilitation*. Paris : Masson, 1993. pp. 207-268. 2-225-84175-6.
- Grundfos. [ca 2015].** *SP - Manuel d'ingénierie*. [ca 2015]. V7109664/0914/COMPAGNIES DES EAUX/11064-D&I.
- . **[ca 2012].** *SP - Notice d'installation et de fonctionnement*. [ca 2012]. 98076749 1012.

Hanocq, Ch. 1909. Les pompes centrifuges. *Revue universelle des mines, de la métallurgie, des travaux publics, des sciences et des arts appliqués à l'industrie*. Mars 1909, pp. 214-258.

Hydraulic Institute; Europump; US Department of Energy's Office of Industrial Technologies. 2001. Pump Life Cycle Costs: A Guide to LCC Analysis for Pumping Systems - Executive Summary. [en ligne]. 2001. p. 16.

INERIS. 2009. *Benchmark international sur les réglementations et pratiques de maîtrise du vieillissement des installations industrielles*. Verneuil en Halatte (60) : s.n., 2009. p. 91. Institut national de l'environnement industriel et des risques. INERIS- DRA-09-102957-07985C.

KSB. 2005. Chemise de refroidissement. 2005. 3440.52/2-20 G2.

—. **2005.** *Détermination des pompes centrifuges*. 5e. Frankenthal : KSB Aktiengesellschaft Zentrale Kommunikation, 2005.

Loubeau, Florian. 2016. Analyse des phénomènes de vieillissement des matériaux d'isolation électrique de machines de tractions électriques. *Thèse de Doctorat en Génie Électrique*. [en ligne]. 2016. p. 243.

Mabillot, Albert. 1971. *Les Forages d'Eau - Guide pratique*. [éd.] Crépines Johnson-France. Naintré : s.n., 1971.

Martaud, Maurice. 2019. Connaître les causes de vieillissement des pompes. 25 Juin 2019. Maurice Martaud est Expert Technique au Lyre : pôle collecte, réseaux et pompage. Communication personnelle.

Mortaigne, B. 2005. Vieillissement des composites - Mécanismes et méthodologie d'étude. Juin 2005. COR112 V1.

OIE. 1996. *Les pompes centrifuges - Entretien et maintenance*. 1996. Les cahiers techniques. Office International de l'Eau.

Poulain, Jean. 1997. Pompes rotodynamiques. Avril 1997. p. 16. B 4 308.

SEE. 2008. Étude pompes horizon 2010. 2008. Société des Eaux de l'Est - Communication interne.

Smith, Stuart A. 1995. *Monitoring and Remediation Wells : Problem Prevention, Maintenance, and Rehabilitation*. New York : CRC Press, 1995. p. 208. ISBN 0-87371-562-4.

SNECOREP. 2010. *Installations de pompage - Guide Technique*. POUILLEY-LES-VIGNES : Média contacts création, 2010. Syndicat National des Entrepreneurs, Concepteurs et Réalisateurs de Stations de Pompage.

SUEZ. Langage des analystes de l'eau. *Mémento Degrémont*. [En ligne] <https://www.suezwaterhandbook.fr/eau-et-generalites/l-eau-ses-proprietes/langage-des-analystes-de-l-eau>.

Thin, D. 1955. *Les pompes et leurs applications*. s.l. : Eyrolles, 1955.

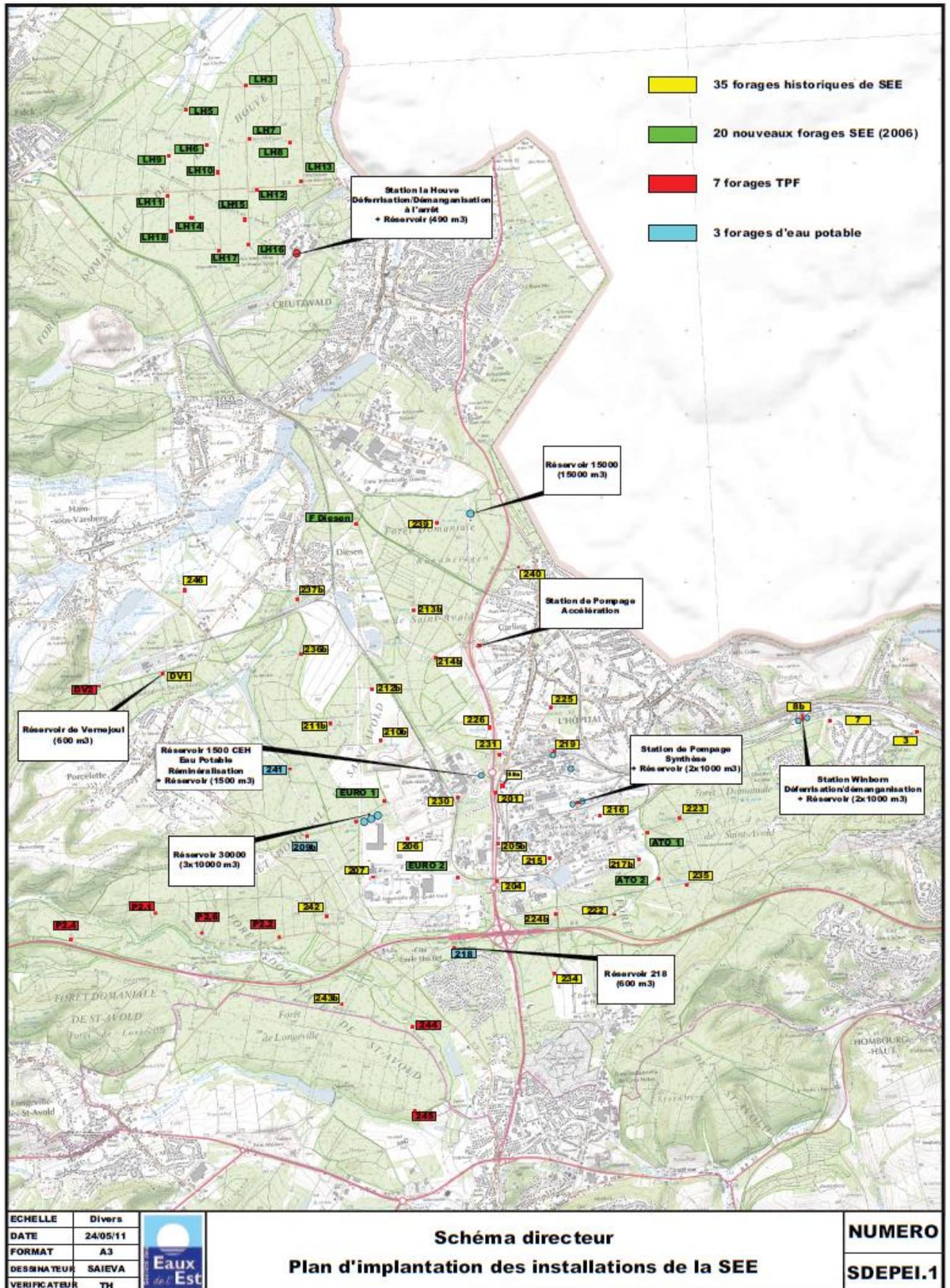
Van Holsteijn en Kemna BV and Viegand Maagøe A/S. 2018. Ecodesign Pump Review. *Study of Commission Regulation (EU) No. 547/2012 (Ecodesign requirements for water pumps) - Extended report (final version)*. December 2018. Prepared for European Commission.

Vedel, Denis. 2019. Entretien avec Denis VEDEL (Membre du SNECOREP) concernant le vieillissement des pompes de forages. [en ligne]. 25 juin 2019. Communication personnelle.

Annexes

Annexe 1 : Localisation géographique des forages	73
Annexe 2 : Types de roues.....	74
Annexe 3 : Exemple de courbe caractéristique de pompe.....	75
Annexe 4 : Rappels – Glossaire de chimie de l'eau.....	76
Annexe 5 : Évaluation de la corrosivité et de l'agressivité de l'eau.....	78
Annexe 6 : Échelle galvanique	79
Annexe 7 : Loi d'Arrhenius reliant la durée de vie d'un isolant électrique à la température	80
Annexe 8 : Classes thermiques d'isolants électriques	80
Annexe 9 : Formule de calcul de la vitesse moyenne d'écoulement autour du moteur	81
Annexe 10 : Fiche de suivi des pompes en défaut analysées dans le cadre du protocole de l'étude de 2010.....	82
Annexe 11 : Illustrations des expertises réalisées sur les pompes en panne durant l'étude de 2007 à 2010.....	85
Annexe 12 : Fiche de révision de forage - collecte d'informations	90
Annexe 13 : Données récoltées concernant les groupes motopompes.....	91
Annexe 14 : Données récoltées relatives aux forages	92
Annexe 15 : Intervalles de concentration pour le calcul de l'indice sur le fer et sur le manganèse	93
Annexe 16 : Rappels sur les méthodes d'utilisation et d'interprétation des tests statistiques utilisés dans l'étude	94
Annexe 17 : Tableau des corrélations croisées des paramètres d'étude des motopompes.....	96
Annexe 18 : Caractérisation des groupes obtenus lors de la CAH sur les motopompes	97
Annexe 19 : Tableau des valeurs propres de l'ACP sur les motopompes	98
Annexe 20 : Tableau des corrélations entre les paramètres étudiés et les axes principaux de l'ACP sur les motopompes	98
Annexe 21 : Méthode de calcul des effectifs théoriques pour le χ^2	99
Annexe 22 : Détail des résultats du test du χ^2 effectué sur la base de données des motopompes	100
Annexe 23 : Tableau des corrélations croisées sur les paramètres des forages	102
Annexe 24 : Caractérisation des groupes obtenus lors de la CAH sur les forages	103
Annexe 25 : Tableau des valeurs propres de l'ACP sur les forages	104
Annexe 26 : Tableau des corrélations entre les paramètres étudiés et les axes principaux de l'ACP sur les forages	104
Annexe 27 : Détail des résultats du test du χ^2 effectué sur la base de données des forages.....	105
Annexe 28 : Exemple d'influence entre forages : courbes de débit des forages F204, F206, F207 et F242.....	106
Annexe 29 : Fiche de consultation pour l'achat de pompes.....	107
Annexe 30 : Illustration de l'outil d'aide à la décision du Service Achats	109
Annexe 31 : Illustration de l'outil d'aide à la décision personnalisé pour la SEE	110
Annexe 32 : Test de l'influence des coefficients de pondération sur l'outil d'estimation de la durée de vie des motopompes	111

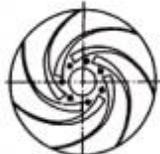
Annexe 1 : Localisation géographique des forages



Annexe 2 : Types de roues

Roues axiale, radiale ou semi-axiale :

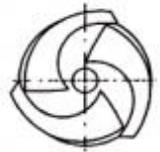
- Avec une roue axiale (ou hélice) le liquide s'écoule parallèlement au sens dans lequel il est arrivé (même sens que l'arbre), cette roue permet le refoulement de grands débits à faible hauteur.
- Avec une roue radiale, le fluide est dirigé et projeté par la roue perpendiculairement à son sens d'arrivée. Cette roue est propice au refoulement de faibles débits avec une grande énergie.
- La roue semi-axiale est un compromis entre les deux précédentes roues : le fluide est projeté de façon oblique par la roue. Cela permet de refouler des débits importants avec une énergie importante.



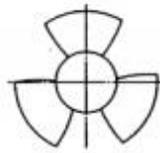
Roue centrifuge à écoulement radial



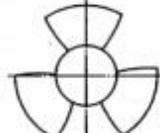
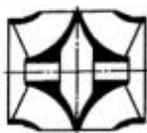
Roue hélico-centrifuge fermée à écoulement semi-axial



Roue hélico-centrifuge ouverte à écoulement semi-axial

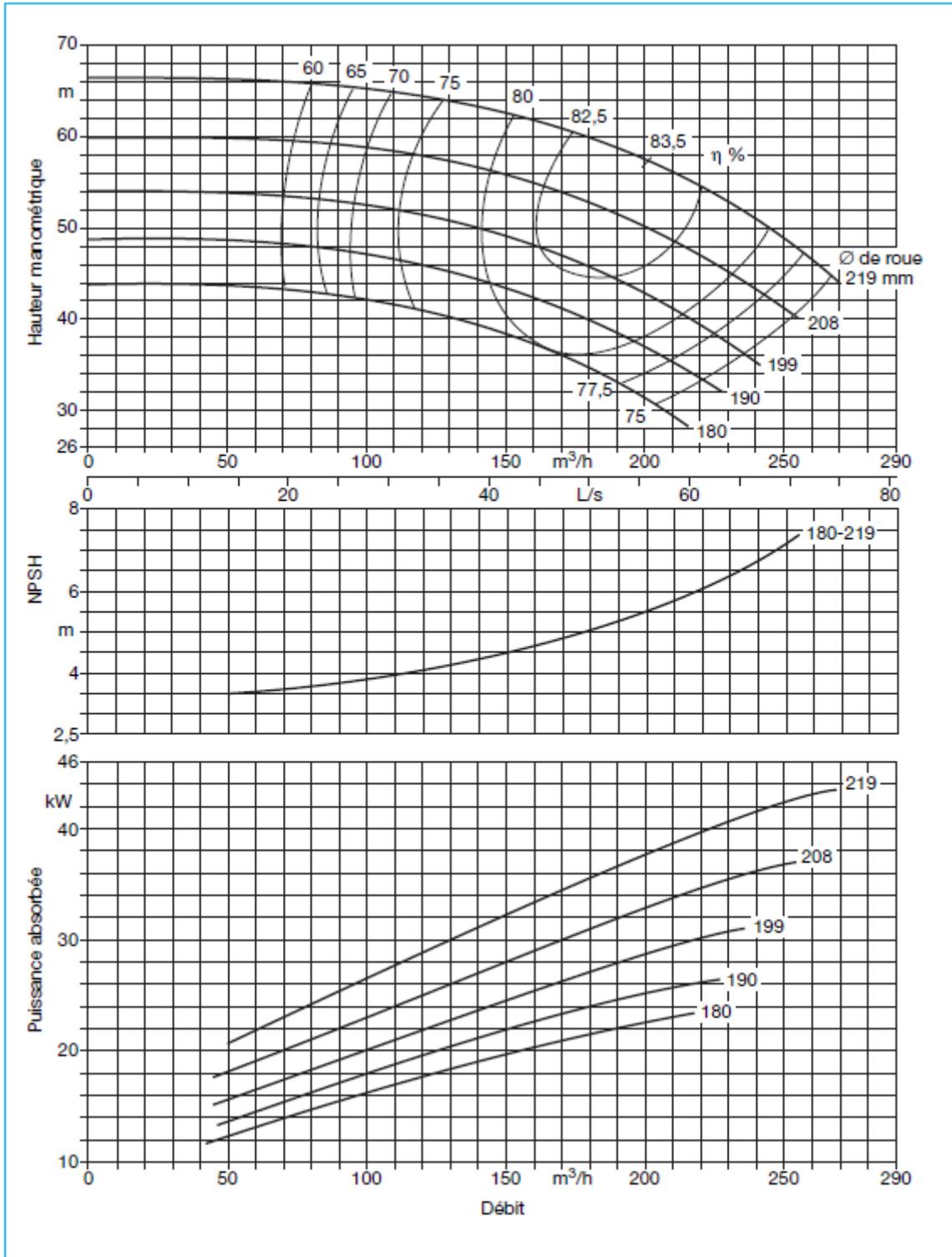


Roue à hélice à écoulement axial



Roue semi-axiale fermée à double ouïe d'aspiration (pour pompe à plan de joint)

Annexe 3 : Exemple de courbe caractéristique de pompe



(Source : KSB, 2005, Détermination des pompes centrifuges ; 5^e éd.)

Annexe 4 : Rappels – Glossaire de chimie de l'eau

Degré français

Le degré français est une unité caractérisant la concentration

$$1^{\circ}f = 0.2 \text{ méq/L}$$

Et les équivalents par litre (éq/L) sont quant à eux le produit de la concentration molaire par la valeur absolue de la valence de l'ion.

pH

Le potentiel hydrogène (pH) permet de voir si l'eau est acide ($\text{pH} < 7$), neutre ($\text{pH} = 7$) ou alcaline ($\text{pH} > 7$).

pH à saturation, pH_s

Le potentiel hydrogène à saturation est le pH pour lequel l'eau n'est ni saturée ni en carence de carbonate de calcium.

Titre hydrotimétrique (TH)

Le TH correspond à la teneur globale en sels de calcium et de magnésium. Il s'exprime généralement en degrés français. Il caractérise la dureté de l'eau, c'est-à-dire sa tendance à se déposer (eau entartrante ou dure) ou à ronger les canalisations (eau agressive ou douce). Plus il augmente plus l'eau est dure.

Titre alcalimétrique (TA)

Le TA permet de connaître les teneurs en carbonates et bases fortes présentes dans l'eau. Il s'exprime en degrés français. Il est la somme du taux d'hydroxydes (OH^-) et de carbonates (CO_3^{2-}).

Le TA est généralement nul dans les eaux naturelles.

Titre alcalimétrique complet (TAC)

Le TAC, à la différence du TA, prend aussi en compte les ions bicarbonates. Il s'exprime en degrés français. Il est la somme du taux d'hydroxydes (OH^-), de carbonates (CO_3^{2-}) et d'hydrogénocarbonates (HCO_3^-).

Conductivité

La conductivité de l'eau caractérise sa salinité : sa teneur en ions, éléments aptes à conduire le courant. Elle s'exprime généralement en micro-siemens par centimètre ($\mu\text{S/cm}$)

Corrosivité

La corrosivité est la capacité d'une eau à dissoudre des éléments métalliques.

Agressivité

L'agressivité de l'eau est sa tendance à dissoudre le calcaire (qui se dépose sur les installations) et à corroder ces mêmes installations.

Potentiel d'oxydo-réduction

Le potentiel d'oxydo-réduction (ou potentiel redox) est couramment noté Eh et exprimé en millivolts (mV). Il caractérise la nature oxydante ou réductrice d'une eau. Il varie en fonction du pH et rend les espèces en solution plus ou moins stables. Le diagramme potentiel-pH (ou diagramme de Pourbaix) permet d'anticiper la forme sous laquelle un élément va être majoritairement trouvé en fonction du potentiel d'oxydo-réduction et du pH.

Annexe 5 : Évaluation de la corrosivité et de l'agressivité de l'eau

Afin de qualifier l'agressivité et la corrosivité des eaux, des calculs d'indices sont menés.

L'**indice de Langelier** est utile pour caractériser l'agressivité de l'eau : sa capacité à dissoudre le calcaire et attaquer les équipements par corrosion. Cependant, il requiert la connaissance du pH à saturation (pH pour lequel l'eau n'est ni saturée ni en carence de carbonate de calcium). Il est noté I_L ou I_S .

$$I_L = pH - pH_s$$

pH , valeur mesurée sur le terrain

pH_s , pH de l'eau à saturation

Le pH à saturation peut être évalué par le calcul mais les paramètres utilisés ne sont pas connus car ils ne sont pas mesurés lors des analyses commandées chaque année pour la SEE.

Ainsi, dans cette étude l'eau est considérée comme agressive si :

- Son TAC est inférieur à 8
- Sa conductivité est inférieure à 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$

De plus, dans cette étude, l'eau est considérée corrosive si :

- Son **indice de Leroy** est inférieur à 0,7 ou supérieur à 1,3
- Son **indice de Larson** est supérieur à 1.

$$\text{IndLer} = \frac{TAC}{TH}$$

$$\text{IndLar} = \frac{[Cl^-] + 2[SO_4^{2-}]}{[HCO_3^-]} \approx \frac{[Cl^-] + 2[SO_4^{2-}]}{TAC_{HCO_3^-}}$$

IndLer: Indice de Leroy

TAC: Titre Alcalimétrique Complet

TH: Titre Hydrotimétrique

IndLar: Indice de Larson

$[Cl^-]$: Concentration en ions chlorures (mol. L^{-1})

$[SO_4^{2-}]$: Concentration en ions sulfates (mol. L^{-1})

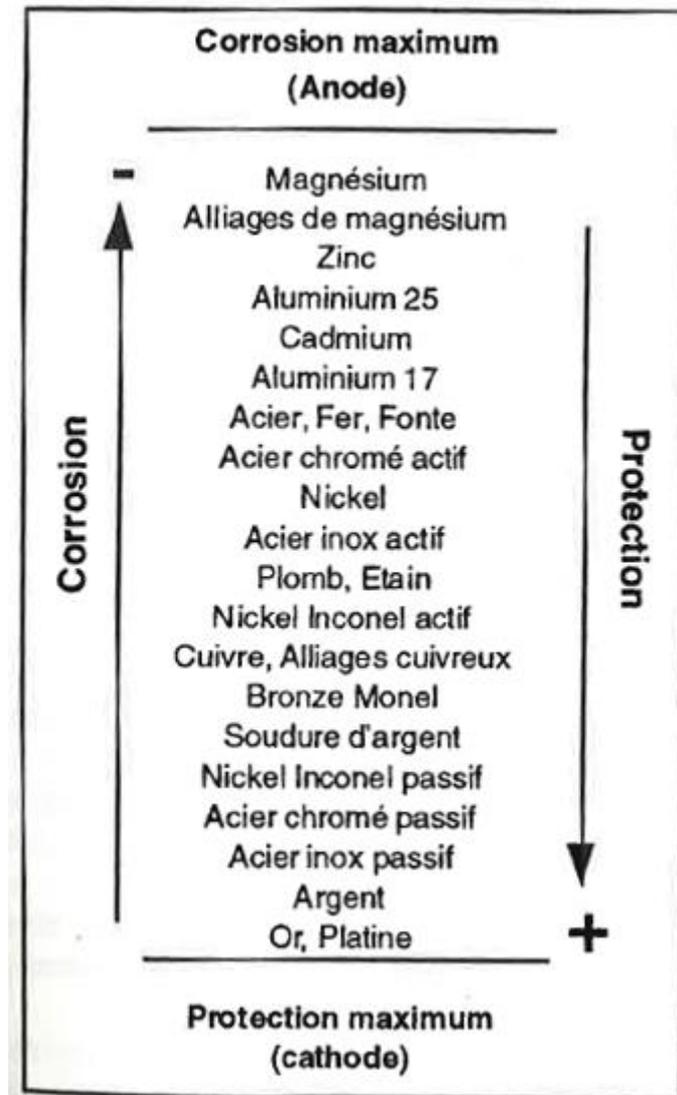
$[HCO_3^-]$: Concentration en ions hydrogénocarbonates (mol. L^{-1})

$TAC_{HCO_3^-}$: Concentration en ions

hydrogénocarbonates calculée à partir du TAC (mol. L^{-1})

La concentration en ions hydrogénocarbonates (HCO_3^-) n'est pas mesurée dans les échantillons prélevés annuellement sur les forages de la SEE. Toutefois, les eaux ont généralement un titre alcalimétrique nul (BRGM; Greffart, J.; Moniton L., 1969). Et dans ce cas, le titre alcalimétrique complet est égal à la concentration en hydrogénocarbonates (SUEZ).

Annexe 6 : Échelle galvanique



Source : M. DETAY, Le forage d'eau. Réalisation, entretien, réhabilitation., Paris: Masson, 1993, page 241.

Annexe 7 : Loi d'Arrhenius reliant la durée de vie d'un isolant électrique à la température

$$L = Ae^{\frac{-E}{kT}}$$

Avec :

- L , la durée de vie
- A et k , des constantes
- E , l'énergie d'activation
- T , la température absolue.

Annexe 8 : Classes thermiques d'isolants électriques

Tableau 1 - Attribution des classes thermiques

ATE ou RTE		Classe thermique	Lettre d'identification ^a
°C		°C	
≥90	<105	90	Y
≥105	<120	105	A
≥120	<130	120	E
≥130	<155	130	B
≥155	<180	155	F
≥180	<200	180	H
≥200	<220	200	N
≥220	<250	220	R
≥250 ^b	<275	250	-

Si on le souhaite, la lettre d'identification peut être ajoutée entre parenthèses, par exemple Classe 180 (H). Lorsque l'espace est un facteur, par exemple sur une plaque signalétique, le comité de produits peut choisir d'utiliser uniquement la lettre d'identification.

Les désignations de classes thermiques supérieures à 250 doivent augmenter par incréments de 25 et être désignées en conséquence.

Extrait de la norme NF EN 60085 (AFNOR, 2008).

RTE : Indice d'endurance thermique relatif.

Annexe 9 : Formule de calcul de la vitesse moyenne d'écoulement autour du moteur

$$v = \frac{Q \times 4}{3600 \times 10^{-6} \times \pi \times (D^2 - d^2)}$$

$$v \cong \frac{354 Q}{(D^2 - d^2)}$$

Avec :

- v : La vitesse moyenne d'écoulement autour du moteur en m.s^{-1} ,
- Q : Le débit d'eau pompée en $\text{m}^3.\text{h}^{-1}$,
- D : Le diamètre du forage (ou de la jupe le cas échéant) en mm,
- d : Le diamètre du moteur en mm.

Annexe 10 : Fiche de suivi des pompes en défaut analysées dans le cadre du protocole de l'étude de 2010

FORAGE PILOTE XXX

PUITS : XXX

Récolte de données par la SEE

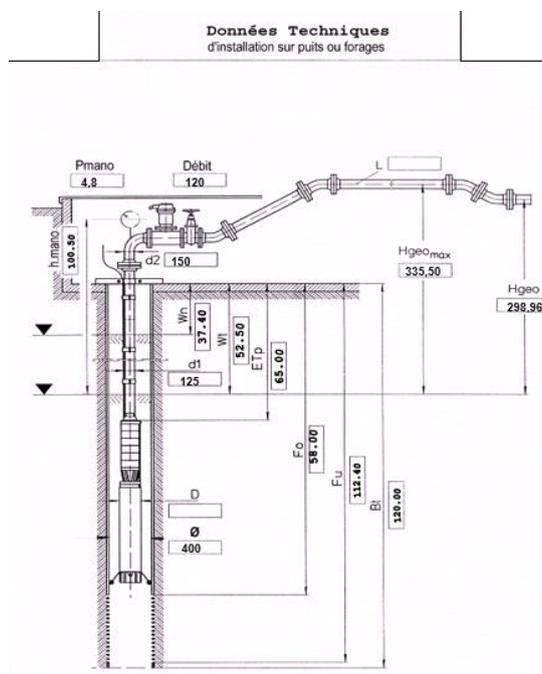
1	Pression refoulement	4,8 bars			
2	débit de la pompe	120 m3/h			
3	intensité absorbée (les 3)	I1 = A	I2 =	I3 =	
4	Tension moteur	V1= V	V2=	V3=	
5	type de protection thermique et valeur de réglage				
5.1	Nombre de démarrage par jour (sur les 7 derniers jours)				
6	les paramètres programmés dans le relais schneider LTMR	Pn : kW	In : A		
		Régl therm :	Déséquil :	Tempo :	
		Un : 430 V	U mini : 85 %	U max : 115 %	
7	nombre de démarrage par jour				
8	temps de marche				
9	y a-t-il un démarreur, si oui paramétrage du démarrage				
10	y a-t-il un VV, si oui paramétrage du VV				
11	presence de parafoudre				
12	schéma de câblage y compris circuit de mise à la terre (avec section de câble)				
13	mesure d'isolement complet (cable, moteur, jonction) pompe dans le forage	kW			
14	Mesure d'isolement complet (cable, moteur, jonction) en dehors du forage, moteur froid				
15	Mesure d'isolement (cable, moteur) en dehors du forage, moteur froid	MW			
16	qualité de l'eau pompée (2 analyses par an) printemps	mg/l de fer	mg/l de Mn	PH	Conduct
	automne	2,92	0,08	6,8	440
17	Voir la boîte de jonction (constat visuel)				
18	la pompe tourne-t-elle librement à la main?				
19	date de montage				
20	date de l'incident				

- 21 ref complete de la pompe
- 22 Nature de la tuyauterie de refoulement Colonne souple type FORADUC DN 125
- 23 Conception du puits Gaine acier inox DN 400

La pompe est envoyée au fournisseur avec le câble d'origine, sans la boîte ni le câble d'alimentation. DATE D'ENVOI :

- 24 vue en coupe du forage avec cote d'installation (Par rapport au niveau dynamique et arrivée d'eau)

Joindre des photos de la pompe



RAPPORT D'EXPERTISE FOURNISSEUR

- 1 Liaison moteur-pompe : mesure du jeu radial
- 2 Liaison moteur-pompe : mesure du jeu axial
- 3 examen visuel extérieur(dépôts, colmatage)
- 4 mesure d'isolement
- 5 separation moteur / hydraulique
- 6 mesure dimensionnelle sortie arbre
- 7 verification rotation hydraulique
- 8 Etat du clapet (vérifier que le clapet se ferme bien)

Initial

A l'expertise

Joindre des photos de la pompe

- 9 démontage total de l'hydraulique
- 10 mesure de jeu entre roue et corps de pompe (pour chaque roue)

- 11 démontage complet du moteur (bas du moteur)
- 12 vérification du niveau du liquide de refroidissement moteur
- 13 Vérification de l'état du liquide de refroidissement
- 14 vérification du jeu axial moteur
- 15 vérification de l'entrée de cable, joint..;
- 16 Vérification des paliers
- 17 vérification de la butée et contre butée
- 18 Vérification du soufflet de dilatation
- 19 vérification du chignon
- 20 vérification du bobinage (état et position dans la stator)
- 21 vérification du rotor (dimension,aspect)
- 22 Vérification des GM
- 23 Si défaut d'isolement, localisation du défaut sur le stator

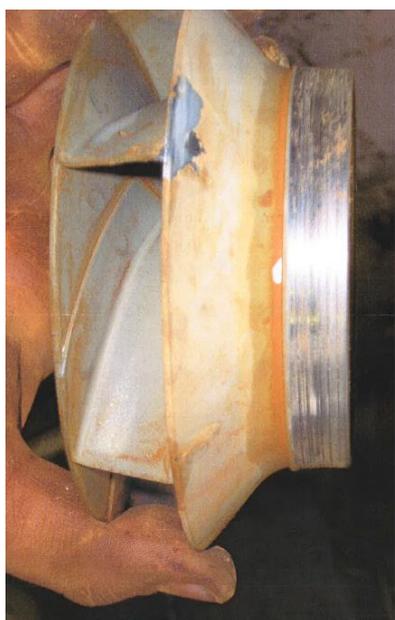
Analyse du résultats de l'expertise, comparaison par rapport aux données de départ, analyse de l'origine de la panne et propositions de corrections ou d'améliorations :

Annexe 11 : Illustrations des expertises réalisées sur les pompes en panne durant l'étude de 2007 à 2010

Tableau de synthèse des diagnostics réalisés sur des pompes en défaut lors de l'étude de 2007

Type de défaut	Description par les fabricants	Nombre d'heures de fonctionnement avant le défaut	Forage (Code Pompe)
Défaut d'isolement	Traces de corrosion, jeu conséquent, revêtement carbone désagrégé, patins acier très rayés	2 002	F_201 (P367)
Défaut d'isolement	Nombreux dépôts dans la pompe. Pas de corrosion sur la fonte.	5 207	F_204 (P375)
Défaut d'isolement	Crépine d'aspiration et clapet anti-retour partiellement bouchés par des dépôts ferrugineux. Joints garniture mécanique brûlés. Liquide refroidissement noir.	7 210	F_224b (G376)
Défaut d'isolement	Défaut d'isolement, reprise en garantie : réparation pompe avec moteur neuf	3 856	F_240 (G364)
Défaut d'isolement	Partie hydraulique partiellement bouchée par des dépôts ferrugineux	3 915	F_P22 (G365)
Défaut d'isolement	Pompe bouchée par des défauts ferrugineux, colmatage complet	1 828	F_Euro1 (SN3)
Défaut d'isolement	Carcasse moteur percée	2 991	F_ATO2 (SN1)
Défaut clapet pompe	Pompe laminée par le sable	1 639	F_Diesen (SN2)

➤ **Photographies de 6^{te}m concernant la pompe du forage Euro 1 (pompe n°P367)**



Usure prématurée de la dernière roue de l'hydraulique



Clapet de la pompe colmaté



Moteur recouvert de dépôts et crépine colmatée

➤ **Photographie de Grundfos concernant la pompe du forage P22 (G365)**



Présence de dépôts même dans l'hydraulique

➤ **Photographies de Grundfos concernant la pompe du forage 224 (Pompe n°G376)**



Joint d'étanchéité brûlé

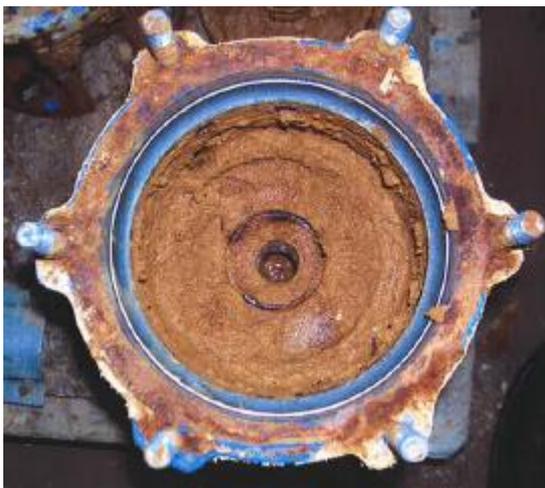
➤ **Photographies réalisées par Flowserve, expertise forage 204 (Pompe n°P375)**



Crépine colmatée



Clapet colmaté



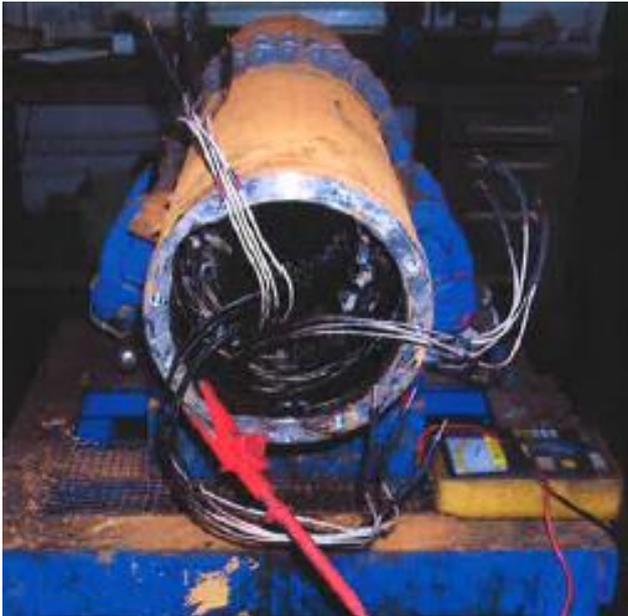
Hydraulique colmatée



Dépôt au niveau du logement des coussinets



Dépôt sur les ailettes du corps d'aspiration après dépose de la crépine



Débobinage



Dépôt noirâtre (carbone / graphite) sur le rotor. Dépôt provenant potentiellement du revêtement carbone du plateau de butée.



Usure normale de la butée



Membrane de dilatation anormalement déformée et rétractée

Annexe 12 : Fiche de révision de forage - collecte d'informations

Forage : Date Causes :

Heures de marche depuis dernière révision : prévuesh réalisées :h

CARACTERISTIQUES DU FORAGE :

Qualité de l'eau :

	Débit (m³/h)	Intensité (A)	Pression Av vanne	Presion Ap vanne	Niveau stat. (m)	Niveau dyn (m)
Carac. nominales						
Carac. au démarr.						
Profondeur (m)	Puits		m	Aspiration		m
	Electrode supérieure		m	Electrode inférieure		m

CARACTERISTIQUES DE LA COLONNE DE REFOULEMENT :

Type	Vissée	Matériaux	Acier	D.N.	Longueur élément (m)	Nbre		
	A bride		Galvanisé			Total	Immergé	Hors-eau
			Star					

Etat d'encrassement et de corrosion des éléments	Immergés	
	Hors-eau	

ETAT DE LA POMPE :

Usure (mm)	Bague	Douille	Turbine	Causes usure	Corrosion	Encrassement
					Sable	

Remplacements effectués :

ETATS CABLE ET MOTEUR ELECTRIQUE :

Etats	Electrique	Câble	Moteur électrique
		Mécanique	
	Réparations effectuées		

CARACTERISTIQUES DU GROUPE :

POMPE	Déposée	Posée	MOTEUR	Déposé	Posé
Type			Type		
Numéro			Numéro		
Date 1ère mise en sce			Date 1ère mise en sce		
Débit (m³/h)			Tension (V)		
HMT (m)			Intensité (A)		
			Puissance (KW)		
			Câble	Type	
				Section	

OBSERVATIONS :

.....

Annexe 13 : Données récoltées concernant les groupes motopompes

	Description	Discrète/ Continue	Quantitative / Qualitative	Statistiques ou commentaire		
				Moyenne	Minimum	Maximum
Informations sur la pompe	Constructeur de la pompe du groupe motopompe	Discrète	Qualitative	Caprari, Grundfos, Pleuger		
	Modèle de la pompe	Discrète	Qualitative	-		
	Année de fabrication de la pompe	Continue	Quantitative	2009	2001	2018
	Débit (m ³ /h) du point de fonctionnement de meilleur rendement	Continue	Quantitative	95	40	128
	Hauteur manométrique totale (mCE) du point de fonctionnement de meilleur rendement de la pompe	Continue	Quantitative	112	43	167
Informations sur le moteur	Constructeur du moteur du groupe motopompe	Discrète	Qualitative	Caprari, Franklin, Grundfos, Pleuger		
	Modèle de moteur	Discrète	Qualitative	-		
	Année de fabrication du moteur	Continue	Quantitative	2009	2001	2018
	Puissance nominale (en KW)	Continue	Quantitative	48	15	83
Informations sur la vie du groupe motopompe	Précise si le groupe a été installé neuf ou si tout ou partie du groupe avait déjà été utilisé auparavant	Discrète	Qualitative	Groupe neuf ou groupe réutilisé (ou réparé)		
	Nombre d'heures de marche de la pompe dans le forage	Continue	Quantitative	9763	0	41054
	Nombre de jours de présence dans le forage (avec ou sans fonctionnement de la pompe)	Continue	Quantitative	1084	32	4303
	Typologie de cause de dépose	Discrète	Qualitative	5 classes de défauts		
	Année de pose - Année de fabrication (de la partie hydraulique)	Continue	Quantitative	0,6	0	7
Matériaux de la pompe	Matériau des roues de la pompe	Discrète	Qualitative	Bronze, Acier inox ou Fonte		
	Nombre de roues	Discrète	Quantitative	6,3	3	15
	Matériau du corps de la pompe	Discrète	Qualitative	Fonte ou inox		
	Duo de matériaux entre le corps de pompe et les roues	Discrète	Qualitative	Fonte/Bronze, Fonte/Fonte, Acier/Acier		
	Matériau des bagues d'usure de la partie hydraulique	Discrète	Qualitative	NBR-FKM, Fonte + Ni ou Inox + caoutchouc		
	Matériau de l'arbre de la pompe	Discrète	Qualitative	Acier inox (306) et acier inox 431		
	Matériau de la crépine d'aspiration	Discrète	Qualitative	Acier inox		
	Matériau des coussinets de la pompe	Discrète	Qualitative	Bronze, Inox + caoutchouc, NBR ou polymère		
Matériaux du moteur	Diamètre moteur (mm)	Continue	Quantitative	187,6	152,4	203,2
	Matériau de la chemise du moteur	Discrète	Qualitative	Fonte, Fonte + acier inox 304, Acier inox 304 ou acier inox 316		
	Matériau de la garniture mécanique	Discrète	Qualitative	SiC/SiC, CER-CARB, CER-CAR-NBR		
	Matériau de la butée du moteur	Discrète	Qualitative	Acier inox, Graphite, AF75, AF100, laiton/ composé synthétique		
	Matériau du bobinage	Discrète	Qualitative	Composite HT, Cuivre verni, PVC, PE ² +PA		
	Bobinage renforcé	Discrète	Qualitative	1 si renforcé (PE ² +PA), 0 sinon		
Conditions d'exploitation	Présence ou non d'une jupe de refroidissement	Discrète	Qualitative	Seulement 2 groupes motopompes ont fonctionné avec une jupe		
	Présence ou non d'un variateur de fréquence	Discrète	Qualitative	6 pompes ont fonctionné avec un variateur		
	Brigade si la différence de pression entre l'aval et l'amont de la vanne au refoulement est supérieure à 0,5 b au moment de la mise en route de la pompe.	Discrète	Qualitative	54% des pompes étaient bridées à leur mise en service		
	Estimation de la vitesse moyenne de l'écoulement autour du moteur calculée à partir du diamètre du puits, du diamètre du moteur et du débit du point de fonctionnement optimal	Continue	Quantitative	0,51	0,11	2,84

Annexe 14 : Données récoltées relatives aux forages

	Description	Discrète/ Continue	Quantitative / Qualitative	Statistiques ou commentaire		
				Moyenne	Minimum	Maximum
Qualité de l'eau du forage (moyennes des mesures annuelles de 2007 à 2018)	Conductivité de l'eau à 25°C (µS/cm)	Continue	Quantitative	-	95	2002
	Concentration en fer total (µg Fe/L)	Continue	Quantitative	-	27	13990
	Concentration en manganèse total (µg Mn/L)	Continue	Quantitative	-	3	6300
	pH	Continue	Quantitative	-	5	7
	Résidu sec à 180°C (mg/L)	Continue	Quantitative	-	54	1305
	TAC : titre alcalimétrique complet (°F)	Continue	Quantitative	-	1	26
	TH : titre hydrotimétrique (°F)	Continue	Quantitative	-	2	82
	Corrosivité de l'eau	Discrète	Quantitative	Corrosive (1) ou non corrosive (0)		
	Agressivité de l'eau	Discrète	Quantitative	Agressive (1) ou non agressive (0)		
Conception et état du forage	Localisation du forage (plus ou moins éloigné de la plateforme industrielle)	Discrète	Qualitative	-		
	Âge du forage (calculé en prenant 2019 comme année de référence)	Continue	Quantitative	-	5	103
	Fréquence de régénération : nombre de régénération(s) réalisée(s) entre la création du forage et 2019, divisé par l'âge du forage	Continue	Quantitative	-	0	0,22
	Fréquence de rechemisage: nombre de rechemisage(s) réalisé(s) divisé par l'âge du forage (référence : 2019)	Continue	Quantitative	-	0	0,11
	Fréquence de maintenance du forage: nombre de rechemisage(s) et régénération(s) réalisé(s) divisé par l'âge du forage (référence : 2019)	Continue	Quantitative	-	0	0,33
	Diamètre intérieur du tubage du forage (mm)	Continue	Quantitative	-	225	600
	Evaluation de la position du sommet de la pompe par rapport à la position du tubage crépiné du forage	Discrète	Quantitative	1 si bonne position (au-dessus des crépines), -1 si pompe au niveau des crépines		
	Evaluation de la position du sommet de la pompe par rapport à la position du tubage crépiné du forage	Discrète	Qualitative	Pompe au-dessus des crépines ou pompe au niveau des crépines		
	Remarque concernant le pompage de sable au-delà de certains débits	Discrète	Qualitative	-		
	Remarque concernant la présence de biofilm (soit film blanc visqueux soit boue rouge molle)	Discrète	Qualitative	-		
	Remarque issue des rapports de régénérations indiquant des venues d'eau viennent d'horizons différents	Discrète	Qualitative	-		
	Matériau de la colonne de refoulement du forage	Discrète	Qualitative	-		
	Matériau du tubage du forage	Discrète	Qualitative	-		
	Durée moyenne d'un cycle de fonctionnement (heures/démarrage)	Continue	Quantitative	-		

Annexe 15 : Intervalles de concentration pour le calcul de l'indice sur le fer et sur le manganèse

- Calcul de l'indice du fer
 - Indice égal à 1 : Concentration inférieure à 200 µg/L de Fe
 - Indice égal à 2 : Concentration comprise entre 200 et 1 500 µg/L de Fe
 - Indice égal à 3 : Concentration comprise entre 1 500 et 3 000 µg/L de Fe
 - Indice égal à 4 : Concentration comprise entre 3 000 et 4 000 µg/L de Fe
 - Indice égal à 5 : Concentration supérieure à 4 000 µg/L de Fe

- Calcul de l'indice du manganèse
 - Indice égal à 1 : Concentration inférieure à 50 µg/L de Mn
 - Indice égal à 2 : Concentration comprise entre 50 et 300 µg/L de Mn
 - Indice égal à 3 : Concentration comprise entre 300 et 600 µg/L de Mn
 - Indice égal à 4 : Concentration comprise entre 600 et 1 000 µg/L de Mn
 - Indice égal à 5 : Concentration supérieure à 1 000 µg/L de Mn

Remarque : La borne supérieure est comprise dans l'intervalle.

Annexe 16 : Rappels sur les méthodes d'utilisation et d'interprétation des tests statistiques utilisés dans l'étude

Statistiques exploratoires

Les statistiques exploratoires visent à décrire un ensemble de données de façon synthétique. Deux outils des statistiques exploratoires ont été utilisés ici sur les données quantitatives :

- La Classification Ascendante Hiérarchique (CAH),
- L'Analyse en Composantes Principales (ACP).

La CAH calcule la distance entre des individus formant un nuage de points et permet ensuite de regrouper les individus qui se ressemblent (proches) au sein de classes. Pour chaque variable quantitative, une « valeur-test » est calculée. Si la valeur absolue de celle-ci est supérieure à 2, la variable est discriminante : elle marque l'identité du groupe. Alors, l'étude de la moyenne de cette variable au sein de la classe par rapport à la moyenne dans la population globale permet de caractériser les individus du groupe.

Une ACP peut ensuite être réalisée afin de placer les individus les uns par rapport aux autres dans un graphique dont les axes portent les informations principales.

Avant de réaliser ces analyses, il est utile de voir quelles grandeurs sont corrélées entre elles afin d'éviter les redondances d'informations. Pour cela, un test de corrélation est réalisé.

Étude des corrélations sur les données quantitatives

Seule la corrélation linéaire est ici testée. Le coefficient de corrélation r peut être calculé à partir de la distribution des individus étudiés en fonction de deux grandeurs X et Y .

$$r = \frac{COV(X,Y)}{\sqrt{V(X)V(Y)}}$$

Avec :

- r , le coefficient de corrélation
- $COV(X, Y)$, la covariance des variables X et Y
- $V(X)$, la variance de la variable X .

Le coefficient de corrélation caractérise l'existence, la nature et la force d'une relation. Il est compris entre -1 et 1. Lorsqu'il est nul, il n'y a pas de relation linéaire entre les deux grandeurs étudiées (X et Y). Lorsqu'il est proche de 1, la corrélation est forte et positive. Quand il tend vers -1, la corrélation est forte et négative (les deux grandeurs évoluent dans le sens contraire).

La significativité de la corrélation peut être vérifiée avec un test de Student, via le paramètre t . Le paramètre t suit une loi de Student.

L'hypothèse nulle H_0 est telle que le coefficient r est nul, il n'y a pas de corrélation linéaire. L'hypothèse alternative H_1 est que le coefficient r est non nul et qu'une corrélation existe.

$$t = \frac{r}{\sqrt{\frac{1-r^2}{n-2}}}$$

Avec :

- t , le paramètre de Student
- r , le coefficient de corrélation
- n , le nombre d'individus.

La loi inverse de Student permet alors de trouver la probabilité $P(> |t|)$ que le paramètre t , de façon générale, soit supérieur au t de l'échantillon (en valeur absolue). Si cette probabilité est inférieure à 10 %, alors l'hypothèse H_0 est rejetée avec un risque de 10 %. Une corrélation semble exister.

Étude des corrélations sur les données qualitatives

Pour étudier l'influence de données qualitatives sur le nombre d'heures de fonctionnement des motopompes c'est l'analyse de la variance (ANOVA) qui est choisie. Elle permet la comparaison simultanée de plusieurs moyennes en fonction de facteurs de classification. Toutefois, l'ANOVA ne peut être réalisée que sur des populations gaussiennes. C'est-à-dire que la distribution des individus doit vérifier la normalité. De plus il y a une condition d'équivalence (ou homoscedasticité).

Il existe plusieurs tests de normalité, comme par exemple celui de Shapiro-Wilk. La normalité est vérifiée avec un seuil de risque de 10 % si la $p - value$ est supérieure à 10 %.

C'est ensuite le test de Bartlett qui permet de vérifier l'équivalence. Si la $p - value$ est inférieure à 10 %, l'hypothèse d'équivalence est rejetée au seuil de risque de 10 %, au moins un des échantillons présente une variance différente de celle des autres échantillons.

L'ANOVA analyse la variance des individus d'un même échantillon par rapport à la variance des échantillons entre eux. Son paramètre statistique suit une loi de Fisher. Si la $p - value$ obtenue est inférieure à 10 %, au moins un facteur de classification étudié influence la grandeur mesurée.

Lorsque l'équivalence et la normalité ne sont pas vérifiées, un test du χ^2 est mené. Ce dernier est moins puissant mais plus robuste que l'ANOVA.

Le test du χ^2 nécessite la création d'intervalles pour la grandeur de mesure. Ici par exemple, le nombre d'heures de fonctionnement est scindé en tranches d'heures. Le test du χ^2 étudie la répartition réelle des effectifs dans ces tranches en fonction des facteurs de classification à une répartition théorique des effectifs (Annexe 21), dans laquelle les facteurs de classification n'ont pas d'influence. Si la $p - value$ est inférieure à 10 %, les répartitions théorique et réelle sont significativement différentes, le facteur de classification a une influence sur la grandeur mesurée. Les effectifs théoriques doivent être de 5. Il faut donc créer des tranches de façon précautionneuse en prenant en compte le nombre de facteurs de classification et la répartition des individus en fonction des facteurs.

Annexe 17 : Tableau des corrélations croisées des paramètres d'étude des motopompes

	Année de fabrication ppe	Débit de rdt optimal	Hmt de rdt optimal	Année de fabrication mot	Nb d'heures d'heures	Temps présence dans forage (j)	Année pose	Nombre d'années passées en stock	Puissance Kw	Débit mise en service	Nombre roues	Diamètre moteur (mm)	Vitesse de circulation autour du moteur (m/s)avec débit point fonctionnement optimal
Année de fabrication ppe		-0,8149	-0,0329	0	-0,0206	-0,0206	0	0	-0,022	0,3942	-0,0118	-0,0016	-0,0141
Débit de rdt optimal			0,0928	-0,4427	0,637	-0,9	-0,3734	-0,0553	0	0	0	0,0002	0,1178
Hmt de rdt optimal				-0,0206	0,4021	-0,0752	-0,0308	0,6387	0	0,0111	0,9231	0	0,1079
Année de fabrication mot					-0,0145	-0,022	0	-0,0028	-0,0096	0,6676	-0,0243	-0,0019	-0,1561
Nb d'heures						0	-0,0392	0,1836	0,1742	0,7454	0,0115	0,4542	0,1036
Temps présence dans forage (j)							-0,0721	0,0345	-0,3778	-0,5125	0,1794	-0,227	0,5215
Année pose								-0,293	-0,0085	0,631	-0,0579	-0,0014	-0,2644
Nombre d'années passées en stock									-0,6966	-0,1814	0,0132	0,5009	0
Puissance Kw										0	-0,0013	0	0,0038
Débit mise en service											0	0,0001	-0,5692
Nombre roues												-0,0935	0,2235
Diamètre moteur (mm)													0,065
Vitesse de circulation autour du moteur (m/s)avec débit point fonctionnement optimal													

Commentaire :

Les valeurs dans les cases correspondent à la valeur de la *p-value* à laquelle a été affecté le signe du coefficient de corrélation *r*.

Si la valeur absolue de la valeur dans la case est inférieure à 0,1 alors une corrélation existe. Si la valeur est négative (cases en bleu), la corrélation est négative. Si la valeur est positive (cases en rouge), la corrélation est positive.

Lorsque la *p-value* était nulle, seule la couleur de la case permet de connaître le sens de la corrélation.

Annexe 18 : Caractérisation des groupes obtenus lors de la CAH sur les motopompes

Classe 1			
Effectif	[32,4 %] 34		
Paramètre	Valeur-test	Groupe	Population globale
		Moyenne (Écart-type)	Moyenne (Écart-type)
Puissance Kw	8,55	68,85 (7,06)	49,41 (16,05)
Nb d'heures	0,92	10253,62 (7022,81)	9280,61 (7447,47)
Nombre d'années passées en stock	-1,39	0,32 (0,53)	0,52 (1,02)
Année de fabrication de la pompe	-1,82	2007,65 (1,67)	2008,50 (3,32)
Nombre roues	-5,24	4,82 (0,90)	6,23 (1,89)

Classe 2			
Effectif	[21,9 %] 23		
Paramètre	Valeur-test	Groupe	Population globale
		Moyenne (Écart-type)	Moyenne (Écart-type)
Année de fabrication de la pompe	8,37	2013,65 (2,42)	2008,50 (3,32)
Nombre roues	-1,27	5,78 (1,70)	6,23 (1,89)
Nb d'heures	-2,54	5782,78 (6840,01)	9280,61 (7447,47)
Nombre d'années passées en stock	-2,77	0,00 (0,00)	0,52 (1,02)
Puissance Kw	-4,15	37,09 (10,33)	49,41 (16,05)

Classe 3			
Effectif	[45,7 %] 48		
Paramètre	Valeur-test	Groupe	Population globale
		Moyenne (Écart-type)	Moyenne (Écart-type)
Nombre roues	5,98	7,44 (1,72)	6,23 (1,89)
Nombre d'années passées en stock	3,6	0,92 (1,33)	0,52 (1,02)
Nb d'heures	1,24	10267,44 (7650,84)	9280,61 (7447,47)
Puissance Kw	-4,59	41,54 (8,59)	49,41 (16,05)
Année de fabrication de la pompe	-5,24	2006,65 (1,63)	2008,50 (3,32)

Annexe 19 : Tableau des valeurs propres de l'ACP sur les motopompes

Axe principal	Valeur propre	Pourcentage d'inertie (%)	Pourcentage d'inertie cumulé (%)
1	1,76	35,1%	35,1%
2	1,30	26,0%	61,1%
3	0,91	18,2%	79,3%
4	0,60	12,1%	91,4%
5	0,43	8,6%	100%

Annexe 20 : Tableau des corrélations entre les paramètres étudiés et les axes principaux de l'ACP sur les motopompes

Paramètre	Axe 1	Axe 2
Année de fabrication de la pompe	-74,9%	33,2%
Nombre d'années passées en stock	69,6%	3,4%
Nombre roues	63,5%	55,4%
Nb d'heures	55,4%	-19,2%
Puissance Kw	2,2%	-91,8%
Var. Expl.	1,76	1,30

Annexe 21 : Méthode de calcul des effectifs théoriques pour le Khi²

Tableau d'exemple d'effectifs théoriques calculés

Constructeur de la pompe	Effectifs théoriques par tranches d'heures			Effectif total
	0 - 5 000 h	5 000 - 10 000 h	> 10 000 h	
GRUNDFOS	13	11	13	37
PLEUGER	18	15	19	52
CAPRARI	6	5	6	16
Effectif total	37	30	38	105

Les effectifs théoriques sont calculés en partant des sous-totaux des effectifs réels de la façon suivante :

$$Effectif\ théorique = \frac{Effectif\ de\ la\ ligne \times Effectif\ de\ la\ colonne}{Effectif\ total}$$

Par exemple l'effectif théorique des pompes Grundfos ayant fonctionné moins de 5 000 h est calculé en faisant :

$$Effectif\ théorique\ (Grundfos; < 5\ 000h) = \frac{37 \times 37}{105} = 13\ pompes$$

Annexe 22 : Détail des résultats du test du χ^2 effectué sur la base de données des motopompes

EFFECTIFS REELS

EFFECTIFS THEORIQUES

* : effectif théorique < 5

Constructeur de la pompe	Effectifs réels par tranches d'heures			Effectif total
	0 - 5 000 h	5 000 - 10 000 h	> 10 000 h	
GRUNDFOS	9	12	16	37
PLEUGER	14	18	20	52
CAPRARI	14	0	2	16
Effectif total	37	30	38	105

Constructeur de la pompe	Effectifs théoriques par tranches d'heures			Effectif total
	0 - 5 000 h	5 000 - 10 000 h	> 10 000 h	
GRUNDFOS	13	11	13	37
PLEUGER	18	15	19	52
CAPRARI	6	5	6	16
Effectif total	37	30	38	105

Gamme de pompe	Effectifs réels par tranches d'heures			Effectif total
	0 - 5 000 h	5 000 - 10 000 h	> 10 000 h	
SP	9	12	16	37
PN	14	18	18	50
E.S	5	0	2	7
E.P	9	0	0	9
QN	0	0	2	2
Effectif total	37	30	38	105

Gamme de pompe	Effectifs théoriques par tranches d'heures			Effectif total
	0 - 5 000 h	5 000 - 10 000 h	> 10 000 h	
SP	11	13	13	37
PN	14	18	18	50
E.S	2	3	2	7
E.P	3	3	3	9
QN	1	1	1	2
Effectif total	37	30	38	105

Constructeur du moteur	Effectifs réels par tranches d'heures			Effectif total
	0 - 5 000 h	5 000 - 10 000 h	> 10 000 h	
FRANKLIN	5	7	8	20
PLEUGER	14	18	20	52
CAPRARI	14	0	2	16
GRUNDFOS	4	5	8	17
Effectif total	37	30	38	105

Constructeur du moteur	Effectifs théoriques par tranches d'heures			Effectif total
	0 - 5 000 h	5 000 - 10 000 h	> 10 000 h	
FRANKLIN	7	6	7	20
PLEUGER	18	15	19	52
CAPRARI	6	5	6	16
GRUNDFOS	6	5	6	17
Effectif total	37	30	38	105

Gamme du modèle de moteur	Effectifs réels par tranches d'heures			Effectif total
	0 - 5 000 h	5 000 - 10 000 h	> 10 000 h	
FRANKLIN	5	7	8	20
M	11	16	13	40
MH	3	2	7	12
MAC	14	0	2	16
MMS	4	2	4	10
MS	0	3	4	7
Effectif total	37	30	38	105

Gamme du modèle de moteur	Effectifs théoriques par tranches d'heures			Effectif total
	0 - 5 000 h	5 000 - 10 000 h	> 10 000 h	
FRANKLIN	7	6	7	20
M	14	11	14	40
MH	4	3	4	12
MAC	6	5	6	16
MMS	4	3	4	10
MS	2	2	3	7
Effectif total	37	30	38	105

État à l'installation	Effectifs réels par tranches d'heures			Effectif total
	0 - 5 000 h	5 000 - 10 000 h	> 10 000 h	
Neuf	35	27	34	96
Pas neuf	2	3	4	9
Effectif total	37	30	38	105

État à l'installation	Effectifs théoriques par tranches d'heures			Effectif total
	0 - 5 000 h	5 000 - 10 000 h	> 10 000 h	
Neuf	34	27	35	96
Pas neuf	3	3	3	9
Effectif total	37	30	38	105

Bridage	Effectifs réels par tranches d'heures			Effectif total
	0 - 5 000 h	5 000 - 10 000 h	> 10 000 h	
Pas de bridage	18	12	17	47
Bridage	19	18	21	58
Effectif total	37	30	38	105

Bridage	Effectifs théoriques par tranches d'heures			Effectif total
	0 - 5 000 h	5 000 - 10 000 h	> 10 000 h	
Pas de bridage	17	13	17	47
Bridage	20	17	21	58
Effectif total	37	30	38	105

Matériau de la roue	Effectifs réels par tranches d'heures			Effectif total
	0 - 5 000 h	5 000 - 10 000 h	> 10 000 h	
Acier inox	9	12	16	37
Bronze	22	18	22	62
Fonte	6	0	0	6
Effectif total	37	30	38	105

Matériau de la roue	Effectifs théoriques par tranches d'heures			Effectif total
	0 - 5 000 h	5 000 - 10 000 h	> 10 000 h	
Acier inox	13	11	13	37
Bronze	22	18	22	62
Fonte	2	2	2	6
Effectif total	37	30	38	105

Matériau du corps de pompe	Effectifs réels par tranches d'heures			Effectif total
	0 - 5 000 h	5 000 - 10 000 h	> 10 000 h	
Inox	9	12	16	37
Fonte	28	18	22	68
Effectif total	37	30	38	105

Matériau du corps de pompe	Effectifs théoriques par tranches d'heures			Effectif total
	0 - 5 000 h	5 000 - 10 000 h	> 10 000 h	
Inox	13	11	13	37
Fonte	24	19	25	68
Effectif total	37	30	38	105

Matériau bague usure pompe	Effectifs réels par tranches d'heures			Effectif total
	0 - 5 000 h	5 000 - 10 000 h	> 10 000 h	
NBR-FKM	9	12	16	37
Fonte + Ni	14	18	20	52
Inox/caoutchouc	14	0	2	16
Effectif total	37	30	38	105

Matériau bague usure pompe	Effectifs théoriques par tranches d'heures			Effectif total
	0 - 5 000 h	5 000 - 10 000 h	> 10 000 h	
NBR-FKM	13	11	13	37
Fonte + Ni	18	15	19	52
Inox/caoutchouc	6	5	6	16
Effectif total	37	30	38	105

EFFECTIFS REELS
EFFECTIFS THEORIQUES

* : effectif théorique < 5

Matériau coussinets pompes	Effectifs réels par tranches d'heures			Effectif total
	0 - 5 000 h	5 000 - 10 000 h	> 10 000 h	
NBR	9	12	16	37
Polymère	14	18	20	52
Inox/caoutchouc	10	0	0	10
Bronze	4	0	2	6
Effectif total	37	30	38	105

Matériau coussinets pompes	Effectifs théoriques par tranches d'heures			Effectif total
	0 - 5 000 h	5 000 - 10 000 h	> 10 000 h	
NBR	13	11	13	37
Polymère	18	15	19	52
Inox/caoutchouc	4	3	4	10
Bronze	2	2	2	6
Effectif total	37	30	38	105

Matériau chemise moteur	Effectifs réels par tranches d'heures			Effectif total
	0 - 5 000 h	5 000 - 10 000 h	> 10 000 h	
Acier inox	23	30	36	89
Fonte	14	0	2	16
Effectif total	37	30	38	105

Matériau chemise moteur	Effectifs théoriques par tranches d'heures			Effectif total
	0 - 5 000 h	5 000 - 10 000 h	> 10 000 h	
Acier inox 304 + Fonte	31	25	32	89
Fonte	6	5	6	16
Effectif total	37	30	38	105

Garniture mécanique	Effectifs réels par tranches d'heures			Effectif total
	0 - 5 000 h	5 000 - 10 000 h	> 10 000 h	
CER-CARB ou CER-CAR-NBR	9	12	16	37
SiC/SiC	28	18	22	68
Effectif total	37	30	38	105

Garniture mécanique	Effectifs théoriques par tranches d'heures			Effectif total
	0 - 5 000 h	5 000 - 10 000 h	> 10 000 h	
CER-CARB ou CER-CAR-NBR	13	11	13	37
SiC/SiC	24	19	25	68
Effectif total	37	30	38	105

Matériau de la butée du moteur	Effectifs réels par tranches d'heures			Effectif total
	0 - 5 000 h	5 000 - 10 000 h	> 10 000 h	
Graphite	5	7	8	20
AF	14	18	20	52
Composé synthétique + inox ou laiton	14	0	2	16
CER-CARB	4	1	2	7
Acier inox	0	4	6	10
Effectif total	37	30	38	105

Matériau de la butée du moteur	Effectifs théoriques par tranches d'heures			Effectif total
	0 - 5 000 h	5 000 - 10 000 h	> 10 000 h	
Graphite	7	6	7	20
AF	18	15	19	52
Composé synthétique + inox ou laiton	6	5	6	16
CER-CARB	2	2	3	7
Acier inox	4	3	4	10
Effectif total	37	30	38	105

Matériau du bobinage	Effectifs réels par tranches d'heures			Effectif total
	0 - 5 000 h	5 000 - 10 000 h	> 10 000 h	
PVC	10	17	14	41
PE+PA	9	3	10	22
Cuivre verni	9	10	14	33
Composite HT	9	0	0	9
Effectif total	37	30	38	105

Matériau du bobinage	Effectifs théoriques par tranches d'heures			Effectif total
	0 - 5 000 h	5 000 - 10 000 h	> 10 000 h	
PVC	14	12	15	41
PE+PA	8	6	8	22
Cuivre verni	12	9	12	33
Composite HT	3	3	3	9
Effectif total	37	30	38	105

Bobinage renforcé ?	Effectifs réels par tranches d'heures			Effectif total
	0 - 5 000 h	5 000 - 10 000 h	> 10 000 h	
N	28	27	28	83
O	9	3	10	22
Effectif total	37	30	38	105

Bobinage renforcé ?	Effectifs théoriques par tranches d'heures			Effectif total
	0 - 5 000 h	5 000 - 10 000 h	> 10 000 h	
N	29	24	30	83
O	8	6	8	22
Effectif total	37	30	38	105

Annexe 23 : Tableau des corrélations croisées sur les paramètres des forages

	Age	Freq maintenance	Diamètre intérieur utile (mm)	Conclusion position pompe (1/-1)	Score état (/3)	Chlorures (f)	Conductivité à 25C (S/cm)	Fer total (g/L Fe)	Manganèse total (g/L Mn)	pH	Résidu sec à 180°C (mg/L)	Sulfates (f)	Titre alcalimétrique complet (F)	Titre hydrotimétrique (F)	Indice de Larson	Indice de Leroy	Corrosivité (ind)	Agressivité (ind)	Indice Fe	Indice Mn	Score qualité (/12)	Durée de vie moyenne des pompes posées	Temps présence moyen (an)	Temps moyen annuel de fonctionnement (h/année de présence)	Freq remplacement dû à défaut elec	Freq remplacement dû à usure (manque débit et mécanique)	Freq remplacement du choix exploitation	Moyenne de Nombre de démarrages sur le mois	Durée d'un cycle de marche(h/démarrage)	
Age																														
Freq maintenance	0,000																													
Diamètre intérieur utile (mm)	0,000	-0,001																												
Conclusion position pompe	0,000	0,189	-0,171																											
Score état (/3)	0,002	0,199	0,029	-0,001																										
Chlorures (f)	0,363	0,272	0,539	-0,037	0,415																									
Conductivité à 25C (S/cm)	0,036	-0,622	0,246	-0,010	0,634	0,000																								
Fer total (g/L Fe)	-0,665	0,646	-0,778	-0,991	0,234	0,635	0,006																							
Manganèse total (g/L Mn)	0,011	-0,762	-0,455	-0,077	0,663	0,208	0,000	0,006																						
pH	0,000	0,222	-0,161	0,273	-0,195	-0,014	-0,358	0,190	-0,078																					
Résidu sec à 180°C (mg/L)	0,038	-0,628	0,370	-0,012	0,661	0,000	0,000	0,001	0,000	-0,273																				
Sulfates (f)	0,004	-0,104	0,231	-0,046	0,748	0,001	0,000	0,000	0,000	-0,201	0,000																			
Titre alcalimétrique complet (F)	-0,152	0,975	-0,849	-0,714	-0,587	-0,290	0,084	0,023	-0,876	0,000	0,116	0,215																		
Titre hydrotimétrique (F)	0,034	-0,331	0,413	-0,018	0,939	0,001	0,000	0,000	0,000	0,459	0,000	0,000	0,000																	
Indice de Larson	0,081	0,670	0,772	-0,124	0,973	0,000	0,000	-0,359	0,069	0,000	0,000	0,000	-0,003	0,003																
Indice de Leroy	0,000	0,078	-0,046	0,006	-0,183	0,000	0,000	0,467	-0,019	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,017	0,000															
Corrosivité (ind)	0,019	-0,244	0,773	-0,478	0,234	0,007	0,174	0,740	0,139	0,000	0,142	0,175	0,000	0,918	0,008	0,000														
Agressivité (ind)	-0,013	-0,834	-0,595	0,006	-0,116	-0,001	0,000	-0,056	-0,059	-0,475	0,000	-0,010	-0,004	0,000	-0,036	0,128	0,921													
Indice Fe	-0,374	0,398	-0,356	0,837	0,118	0,897	0,052	0,000	0,000	0,080	0,023	0,018	0,018	0,018	-0,121	0,077	0,958	-0,104												
Indice Mn	0,017	-0,682	0,850	-0,015	0,076	0,078	0,000	0,000	0,000	-0,499	0,000	0,000	0,502	0,000	0,288	-0,215	0,143	-0,007	0,000											
Score qualité (/12)	0,415	-0,976	-0,662	-0,383	0,076	0,356	0,003	0,000	0,000	-0,554	0,001	0,000	0,760	0,004	-0,882	-0,661	0,019	-0,401	0,000	0,000										
Durée de vie moyenne des pompes posées	0,034	-0,052	0,200	-0,182	-0,186	-0,399	0,307	-0,168	0,416	0,285	0,384	0,180	0,020	0,011	0,882	-0,565	-0,050	-0,205	-0,155	-0,510	-0,081									
Temps présence moyen (an)	-0,021	0,311	-0,337	0,000	0,000	-0,014	-0,047	-0,717	-0,212	0,072	-0,048	-0,197	0,532	-0,232	-0,057	0,012	-0,029	0,062	-0,862	-0,112	-0,302	0,050								
Temps moyen annuel de fonctionnement (h/année de présence)	0,045	-0,021	0,437	0,000	0,052	0,740	0,427	-0,652	0,205	-0,277	0,402	0,385	0,998	0,257	0,358	-0,089	0,522	-0,590	-0,988	0,530	0,717	0,042	0,000							
Freq remplacement dû à défaut elec	0,057	-0,552	0,042	-0,053	0,048	0,094	0,111	-0,542	-0,446	-0,093	0,181	0,174	-0,375	0,301	0,066	-0,016	0,166	-0,136	-0,128	0,804	-0,481	-0,749	-0,001	-0,524						
Freq remplacement dû à usure (manque débit et mécanique)	-0,786	-0,578	-0,355	-0,075	0,401	0,127	0,118	0,193	0,086	-0,914	0,083	0,173	0,779	0,320	0,286	-0,719	0,615	-0,544	0,045	0,010	0,011	-0,215	-0,004	0,000	-0,017					
Freq remplacement du choix exploitation	-0,098	0,344	-0,182	0,002	-0,012	-0,007	-0,009	-0,791	-0,698	0,088	-0,013	-0,025	0,501	-0,094	-0,012	0,010	-0,092	0,063	0,877	-0,053	-0,338	0,258	0,000	-0,027	0,000	-0,002				
Moyenne de Nombre de démarrages sur le mois	0,056	0,631	0,709	-0,051	0,002	-0,318	-0,111	-0,497	-0,275	0,732	-0,099	-0,080	0,975	-0,143	-0,276	0,458	-0,309	-0,437	-0,426	-0,720	-0,334	0,361	-0,464	0,720	0,426	0,802	-0,347			
Durée d'un cycle de marche(h/démarrage)	0,028	-0,305	0,623	-0,346	-0,445	0,720	0,030	-0,781	0,000	-0,394	0,009	0,013	0,699	0,009	0,112	-0,127	0,669	-0,509	0,785	0,134	0,341	0,005	-0,444	0,072	-0,767	-0,919	0,723	-0,093		

Commentaire :

Les valeurs dans les cases correspondent à la valeur de la p -value à laquelle a été affecté le signe du coefficient de corrélation r . Si la valeur absolue de la valeur dans la case est inférieure à 0,1 alors une corrélation existe. Si la valeur est négative (cases en bleu), la corrélation est négative. Si la valeur est positive (cases en rouge), la corrélation est positive. Lorsque la p -value était nulle, seule la couleur de la case permet de connaître le sens de la corrélation.

Annexe 24 : Caractérisation des groupes obtenus lors de la CAH sur les forages

Effectif	Classe 1 [16,9 %] 11			Classe 2 [38,5 %] 25			Classe 3 [44,6 %] 29		
	Valeur-test	Paramètre	Effectif	Valeur-test	Paramètre	Effectif	Valeur-test	Paramètre	Effectif
		Population globale			Population globale			Population globale	
		Moyenne (Écart-type)			Moyenne (Écart-type)			Moyenne (Écart-type)	
		570,04 (1219,57)			35,57 (25,34)			0,17 (1,00)	
Manganèse total (µg/L Mn)	5,78	2521,07 (2056,63)	Age	5,16	56,24 (21,65)	Conclusion position pompe (1/-1)	5,26	0,17 (1,00)	-0,48 (0,89)
Score qualité (/12)	5,64	9,55 (1,75)	Nombre de démarrages mensuels moyens	4,26	92,35 (74,46)	pH	3,53	6,53 (0,41)	6,30 (0,47)
Résidu sec à 80C (mg/L)	4,93	685,68 (404,71)	Diamètre intérieur utile (mm)	3,92	364,80 (73,32)	Freq maintenance	3,27	0,09 (0,06)	0,06 (0,06)
Freq remplacement dû à usure	4,22	0,37 (0,30)	Score état (/3)	3,86	1,20 (0,76)	Freq remplacement du à choix exploitation	2,92	0,46 (0,35)	0,33 (0,32)
Fer total (µg/L Fe)	4,11	4615,21 (3821,37)	Freq remplacement du défaut électrique	2,13	0,65 (0,29)	Durée de vie moyenne des pompes posées	-0,48	9497,23 (7133,60)	9879,33 (5741,43)
Temps moyen annuel de fonctionnement (h/année de présence)	2,75	5526,69 (4576,27)	Nombre de pompes déposées dans l'historique	1,83	3,28 (1,70)	Temps de marche d'un cycle (h/démarrage)	-0,84	0,30 (0,46)	0,40 (0,90)
Temps de marche d'un cycle (h/démarrage)	2,04	0,91 (1,78)	Temps moyen annuel de fonctionnement (h/année de présence)	1,61	4216,98 (1386,38)	Fer total (µg/L Fe)	-0,85	1483,56 (1992,76)	1779,38 (2489,98)
Nombre de pompes déposées dans l'historique	1,9	3,64 (1,50)	Durée de vie moyenne des pompes posées	0,91	10704,04 (4164,56)	Freq remplacement du défaut électrique	-1,24	0,49 (0,32)	0,55 (0,31)
Age	0,61	39,82 (25,36)	Freq remplacement dû à usure	-0,6	0,10 (0,18)	Résidu sec à 80C (mg/L)	-2,23	228,98 (159,48)	313,56 (272,60)
Score état (/3)	-0,05	0,73 (0,47)	Temps de marche d'un cycle (h/démarrage)	-0,72	0,30 (0,68)	Score qualité (/12)	-2,25	5,10 (1,63)	5,85 (2,37)
Durée de vie moyenne des pompes posées	-0,55	9012,36 (4889,52)	Résidu sec à 80C (mg/L)	-1,52	247,94 (153,76)	Manganèse total (µg/L Mn)	-2,59	129,79 (143,60)	570,04 (1219,57)
Freq maintenance	-1,1	0,05 (0,05)	Freq remplacement du à choix exploitation	-1,67	0,24 (0,27)	Freq remplacement dû à usure	-2,6	0,05 (0,12)	0,12 (0,21)
Freq remplacement du défaut électrique	-1,12	0,45 (0,30)	Manganèse total (µg/L Mn)	-1,8	222,29 (273,92)	Nombre de démarrages mensuels moyens	-2,68	33,67 (15,20)	54,62 (56,05)
pH	-1,32	6,13 (0,33)	Score qualité (/12)	-2,05	5,08 (1,73)	Diamètre intérieur utile (mm)	-2,74	306,21 (26,11)	328,54 (58,58)
Diamètre intérieur utile (mm)	-1,45	305,00 (42,49)	Fer total (µg/L Fe)	-2,3	874,77 (1082,51)	Nombre de pompes déposées dans l'historique	-3,22	2,17 (1,00)	2,85 (1,50)
Freq remplacement du à choix exploitation	-1,7	0,18 (0,25)	Freq maintenance	-2,5	0,04 (0,03)	Temps moyen annuel de fonctionnement (h/année de présence)	-3,65	2237,11 (1585,53)	3555,30 (2592,14)
Nombre de démarrages mensuels moyens	-1,96	24,13 (17,29)	pH	-2,59	6,11 (0,47)	Score état (/3)	-3,74	0,34 (0,61)	0,74 (0,76)
Conclusion position pompe (1/-1)	-2,13	-1,00 (0,00)	Conclusion position pompe (1/-1)	-3,73	-1,00 (0,00)	Age	-5,51	16,14 (7,51)	35,57 (25,34)

Annexe 25 : Tableau des valeurs propres de l'ACP sur les forages

Axe principal	Valeur propre	Pourcentage d'inertie (%)	Pourcentage d'inertie cumulé (%)
1	2,73	39,1%	39,1%
2	1,51	21,5%	60,6%
3	1,08	15,5%	76,0%
4	0,74	10,5%	86,5%
5	0,61	8,7%	95,2%
6	0,33	4,8%	100,0%

Annexe 26 : Tableau des corrélations entre les paramètres étudiés et les axes principaux de l'ACP sur les forages

Paramètre	Axe 1	Axe 2
Fréquence de remplacement dû à un choix d'exploitation	76,0%	1,0%
Temps présence moyen (an)	69,6%	1,0%
Fréquence de remplacement dû à défaut électrique	46,0%	41,0%
Score Etat (/3)	42,0%	1,0%
Fréquence de remplacement dû à l'usure	10,0%	65,0%
Score qualité (/12)	7,0%	40,0%
Age	23,0%	2,0%

Annexe 27 : Détail des résultats du test du Khi^2 effectué sur la base de données des forages

EFFECTIFS REELS

EFFECTIFS THEORIQUES

* : effectif théorique < 5

Secteur géographique	Effectifs réels		Effectif total
	0 - 8 000 h	> 8 000h	
Sur la plateforme	0	5	5
Près de la plateforme	7	6	13
Loin de la plateforme	11	21	32
La Houve	10	5	15
Effectif total	28	37	65

Secteur géographique	Effectifs théoriques		Effectif total
	0 - 8 000 h	> 8 000h	
Sur la plateforme	2	2	5
Près de la plateforme	6	6	13
Loin de la plateforme	14	14	32
La Houve	6	6	15
Effectif total	28	37	105

Matériau de la colonne d'exhaure	Effectifs réels		Effectif total
	0 - 8 000 h	> 8 000h	
ZSM Inox	1	7	8
Souple	27	30	57
Effectif total	28	37	65

Matériau de la colonne d'exhaure	Effectifs théoriques		Effectif total
	0 - 8 000 h	> 8 000h	
ZSM Inox	3	5	8
Souple	25	32	57
Effectif total	28	37	65

Matériau du tubage	Effectifs réels		Effectif total
	0 - 8 000 h	> 8 000h	
PVC	2	10	12
Acier	26	27	53
Effectif total	28	37	65

Matériau du tubage	Effectifs théoriques		Effectif total
	0 - 8 000 h	> 8 000h	
PVC	5	7	12
Acier	23	30	53
Effectif total	28	37	65

Le forage OBO + acier a été ajouté aux forages en acier. Il est dans la tranche > 8 000 h.

Conclusion position pompe	Effectifs réels		Effectif total
	0 - 8 000 h	> 8 000h	
Pompe au niveau des crépines	18	31	49
Pompe au-dessus des crépines	10	6	16
Effectif total	28	37	65

Conclusion position pompe	Effectifs théoriques		Effectif total
	0 - 8 000 h	> 8 000h	
Pompe au niveau des crépines	21	28	49
Pompe au-dessus des crépines	7	9	16
Effectif total	28	37	65

Présence de sable	Effectifs réels		Effectif total
	0 - 8 000 h	> 8 000h	
Sable ou graviers	6	9	15
RAS	22	28	50
Effectif total	28	37	65

Présence de sable	Effectifs théoriques		Effectif total
	0 - 8 000 h	> 8 000h	
Sable ou graviers	6	9	15
RAS	22	28	50
Effectif total	28	37	65

Présence de biofilm	Effectifs réels		Effectif total
	0 - 8 000 h	> 8 000h	
RAS	20	26	46
Boue rouge ou film blanc visqueux	8	11	19
Effectif total	28	37	65

Présence de biofilm	Effectifs théoriques		Effectif total
	0 - 8 000 h	> 8 000h	
RAS	20	26	46
Boue rouge ou film blanc visqueux	8	11	19
Effectif total	28	37	65

Nombre de nappes captées	Effectifs réels		Effectif total
	0 - 8 000 h	> 8 000h	
1 nappe	23	28	51
2 nappes	5	9	14
Effectif total	28	37	65

Nombre de nappes captées	Effectifs théoriques		Effectif total
	0 - 8 000 h	> 8 000h	
1 nappe	22	29	51
2 nappes	6	8	14
Effectif total	28	37	65

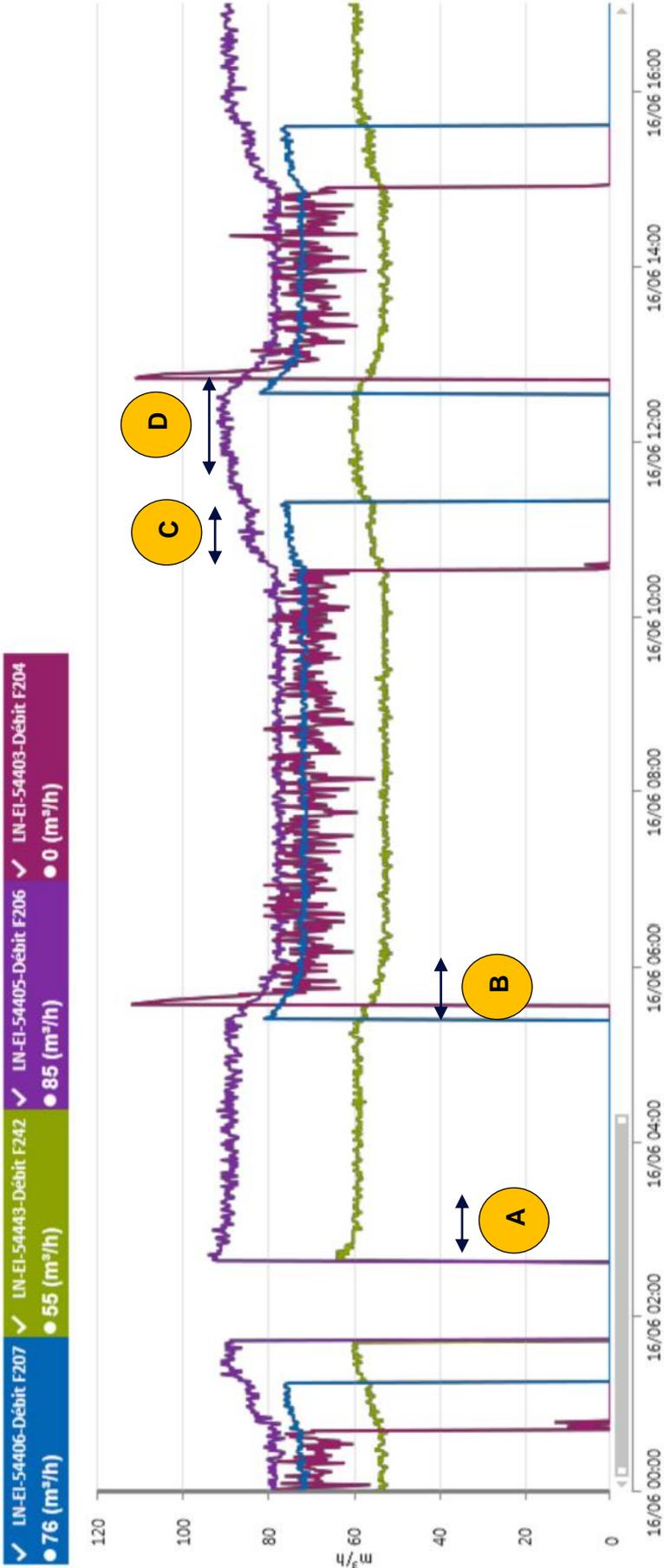
Corrosivité	Effectifs réels		Effectif total
	0 - 8 000 h	> 8 000h	
corrosive	25	25	50
non corrosive	3	12	15
Effectif total	28	37	65

Corrosivité	Effectifs théoriques		Effectif total
	0 - 8 000 h	> 8 000h	
corrosive	22	28	50
non corrosive	6	9	15
Effectif total	28	37	65

Agressivité	Effectifs réels		Effectif total
	0 - 8 000 h	> 8 000h	
non agressive	20	27	47
agressive	8	10	18
Effectif total	28	37	65

Agressivité	Effectifs théoriques		Effectif total
	0 - 8 000 h	> 8 000h	
non agressive	20	27	47
agressive	8	10	18
Effectif total	28	37	65

Annexe 28 : Exemple d'influence entre forages : courbes de débit des forages F204, F206, F207 et F242



A : Démarrage des pompes des forages F206 et F242. Diminution progressive du débit durant le rabattement puis stabilisation.

B : Démarrages successifs des pompes des forages F207 et F204. Toutes les pompes voient leur débit diminuer progressivement (car le niveau se rabat à nouveau) jusqu'à stabilisation. Aussi, il y a plus de pertes de charges à compenser (avec une plus grande HMT à fournir donc) puisque le débit dans la canalisation de refoulement augmente.

C : Arrêt de la pompe du F204. Le niveau d'eau dynamique remonte et il y a moins de pertes de charges à compenser donc le débit des pompes augmente.

D : Arrêt de la pompe du F207. Le débit augmente à nouveau et atteint le débit auquel il était avant le démarrage des pompes du F207 et du F204 au point B.

Annexe 29 : Fiche de consultation pour l'achat de pompes

	Formulaire 2 : SPÉCIFICATION POUR CONSULTATION – POMPES DE FORAGE Rattachée au mode opératoire référence MO_NAT_EP_01
---	--

I. Identification de l'installation

1) Prescripteur

Demandeur :
 Adresse :
 Téléphone :

2) Identification du site

Nom de l'installation :
 Localisation :

II. Cahier des Charges technique

1) Equipement demandé

Nombre de pompe(s) :

a. Caractéristiques de l'installation

> Installation de la pompe :
 Puits ; Bâche usine ; Plan d'eau
 > Montage de la pompe :
 Verticale

b. Caractéristiques du forage : NGF ou TN

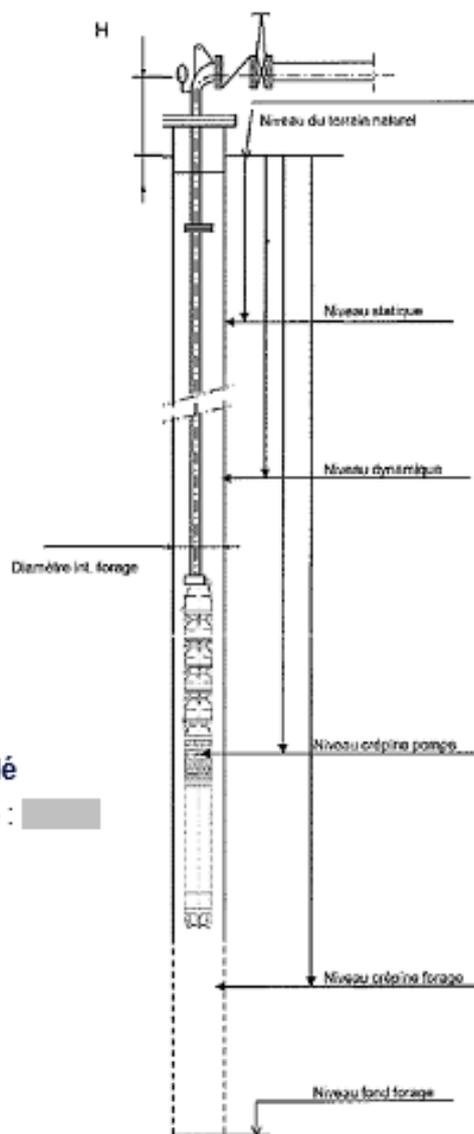
Cote altimétrique de l'installation NGF (m) :
 Niveau statique réf. Terrain Naturel (m) :
 Niveau dynamique réf. TN (m) :
 Niveau sortie pompe réf. TN (m) :
 Niveau sup. crépine ouvrage réf. TN (m) :
 DN du forage (mm) :
 DN de la colonne d'exhaure (mm) :
 Type raccordement pompe / colonne :
 Pas gaz ; Bride

c. Caractéristiques du point de fonctionnement demandé

Débit au point de fonctionnement (m³/h) : HMT (bars) :
 Débit mini (m³/h) : Débit max (m³/h) :

d. Caractéristique du liquide pompé

> Nature du liquide pompé :
 Eau brute ; Eau potable
 > Charge en matière solide :
 Eau claire ; Eau chargée (limon, sable)
 > Besoin agrément ACS sur pompe, câble et jupe
 > Présence éléments :
 Calcaire ; Fer ; Mn ; autre
 > Température eau si supérieur à 19°C :



e. Mode de démarrage

- Direct
- Étoile triangle Valeur temporisation (s) :
- Statorique Valeur temporisation (s) :
- Démarrateur électronique
- Variateur de vitesse

f. Divers

- > Tension alimentation : 380 V ; Autre
- > Contrôle température : Sonde de T° ; Sonde de protection enroulement
- > Câble : longueur (m) : raccordement du câble en usine câble blindé (si P>50kW)
- > Type câble : Rond ; Plat
- > Classe moteur : IE3 Autre

g. Conditions particulières

- Réception pompe en usine (avec essai pompe)
- Réception pompe sur site avec le constructeur
- Délais de livraison attendus :

Informations complémentaires (si nécessaire) :

- Qualité d'eau particulière (présence de Cl⁻, conductivité anormale, sable ?)
- Montage pompe

Reproduction interdite - Propriété de Lyonnaise des Eaux

Annexe 30 : Illustration de l'outil d'aide à la décision du Service Achats



Annexe 10 : COUT GLOBAL D'UNE POMPE EC

Rattachée au mode opératoire référence MO_NAT_EP_01

Index : 3
MAJ du 07/12/15

CACUL DE LA CONSOMMATION ENERGETIQUE & MONTANT DES INVESTISSEMENTS

F231	HMT 11,5 bars	Debit 50 m3/h	Fabricant A	Fabricant B
Volume journalier en m3			1000	1000
Coût du kWh en €			0,1	0,1
HMT en m			119	121
Debit en m3			51	51
Rendement hydraulique <u>au point de fonctionnement</u> (nF)			75,4	78
Rendement de la transmission si présente (nT)			1	1
Rendement moteur <u>au point de fonctionnement</u> (nM)			0,85	0,84
Cos φ <u>au point de fonctionnement</u>			0,8	0,8
Temps de fonctionnement journalier			19,61 h	19,61 h
Puissance absorbée à l'arbre (P2)			21,83	22
Puissance absorbée aux bornes (P1)			26,00 kW	26,19 kW
Intensité absorbée			46,91 A	47,25 A
Consommation spécifique			0,5098 kW/m3	0,51 kW/m3
Energie annuelle facturée			186078 kWh	187442 kWh
Energie annuelle consommée			232598 kVA	234302 kVA
Coût annuel énergie			18 608 €	18 744 €
Intensité nécessaire disjoncteur abonné <u>pour 1 pompe!</u>			99,82 A	94,51 A
Puissance contrat ou transfo ou disjoncteur nécessaire en KVA <u>pour 1 pompe</u>			33 kVA	33 kVA
Prix net de la pompe			2 117 €	3 396 €
PUISSANCE MOTEUR KW			26	26
Matériaux moteur			Fonte	Fonte
Matériaux pompe			Inox	Inox
Matériaux roue			Inox	Inox
Coût de transport et d'emballage			DDP 57	DDP 57
Frais d'adaptation sur site			8 à 10 semaines	8 à 10 semaines

- REGLER D'UTILISATION DU FORMULAIRE**
- 1) RENSEIGNER LES CASES BLEUES
- 2) La consommation énergétique est calculée en fonction des caractéristiques précises de l'installation à son point de fonctionnement
- 3) La connaissance des rendements (n) et Cos φ au point de fonctionnement précis, est impérative (lecture sur les courbiers et fiches techniques de la pompe et du moteur).
- 4) Le débit de pompage renseigné correspond à celui observé à l'intersection de la courbe de la pompe avec la courbe du réseau. Ceci requiert le tracé du point de fonctionnement.

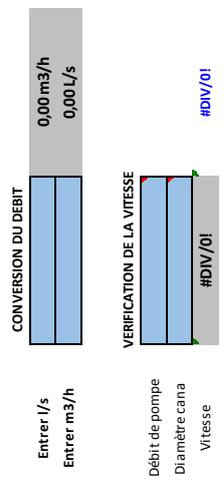


TABLEAU COMPARATIF DU COUT GLOBAL

	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5
Fabricant A					
Invest. (acquisit*+adapt*+instal*)	2 117	0	0	0	0
Energie	18 608	18 608	18 608	18 608	18 608
Maintenance	0	0	0	0	0
Σ Coût Global	20 725	39 333	57 941	76 548	95 156
Fabricant B					
Invest. (acquisit*+adapt*+instal*)	3 396	0	0	0	0
Energie	18 744	18 744	18 744	18 744	18 744
Maintenance	0	0	0	0	0
Σ Coût Global	22 140	40 884	59 628	78 373	97 117

Annexe 31 : Illustration de l'outil d'aide à la décision personnalisé pour la SEE

CACUL DE LA CONSOMMATION ENERGETIQUE & MONTANT DES INVESTISSEMENTS

Menu déroulant
À renseigner
Calcul automatique

Effacer le contenu des cellules bleues

Légende:

Forage	HMT demandée (mCE)	Débit demandé (m3/h)
F_235	70	125

FOURNISSEUR	GRUNDFOS	CAPRARI	KSB
Volume journalier en m3	1123	1123	1123
Coût du kWh en €	0,1	0,1	0,1
HMT en m	71,5	73,33	72,85
Débit en m3/h	126	128,8	125
Rendement hydraulique <u>au point de fonctionnement</u> (ηP)	75,5	80,21	70,1
Rendement de la transmission si présente (ηT)	1	1	1
Rendement moteur <u>au point de fonctionnement</u> (ηM)	0,835	0,846	0,863
Cos φ <u>au point de fonctionnement</u>	0,82	0,82	0,81
Temps de fonctionnement journalier	8,91 h	8,72 h	8,98 h
Puissance absorbée à l'arbre (P2)	32,59	32,5	35,31
Puissance absorbée aux bornes (P1)	39,03 kW	38,42 kW	40,92 kW
Intensité absorbée	68,70 A	67,62 A	72,91 A
Consommation énergétique spécifique (kWh/m3)	0,31	0,30	0,33
Energie annuelle facturée	126970 kWh	122256 kWh	134168 kWh
Energie annuelle consommée	154841 kVA	149093 kVA	165640 kVA
Energie consommée	223494 kWh	215197 kWh	16771023 kWh
Coût annuel énergie	12 697 €	12 226 €	13 417 €
Intensité nécessaire disjoncteur abonné <u>pour 1 pompe !</u>	137,40 A	135,24 A	145,82 A
Puissance contrat ou transfo ou disjoncteur nécessaire en KVA <u>pour 1 pompe</u>	48 KVA	47 KVA	51 KVA
Prix net de la pompe	3 161 €	5 339 €	4 595 €
PUISSANCE MOTEUR KW	37	37	38
Matériaux moteur	Inox	Fonte	Fonte
Matériaux pompe	Inox	Fonte	Fonte
Matériaux roue	Inox	Inox	Composite
Coût de transport et d'emballage	DDP 57	DDP 57	DDP 57
Frais d'adaptation sur site	8 à 10 semaines	8 à 10 semaines	3 semaines

ETUDE UTILITE JUPE

Une jupe est-elle proposée par le fournisseur ?	Oui	Non	Non
Prix de la jupe (€)	392 €		
Position pompe / crépine			
Dia mètre forage (mm)			Pompe au niveau des crépines
Dia mètre moteur (mm)	150	200	200
Dia mètre extérieur jupe (mm)	270		
Marge (mm)	130	Non concerné	Non concerné
Dia mètre intérieur jupe (mm)	254		
Vitesse de circulation autour du moteur sans jupe (m/s)	0,32	0,38	0,37
Vitesse de circulation autour du moteur AVEC jupe (m/s)	1,06	Non étudié	Non étudié
Conclusion	La vitesse moyenne sans jupe est raisonnable. La pompe étant au niveau des crépines, la vitesse moyenne autour du moteur est surestimée.	La vitesse moyenne sans jupe est raisonnable. La pompe étant au niveau des crépines, la vitesse moyenne autour du moteur est surestimée.	La vitesse moyenne sans jupe est raisonnable. La pompe étant au niveau des crépines, la vitesse moyenne autour du moteur est surestimée.

PROJECTION DU NOMBRE D'HEURES DE FONCTIONNEMENT

Gamme pompe	SP	E.S	UPA
Moyenne heures gamme pompe	10 986	6 826	9 281
Gamme mote ur	MMS	MAC	UMA
Moyenne heures gamme moteur	13 427	4 164	9 281
Matériau roue	Acier inox	Bronze	Composite
Moyenne heures matériau	10 986	8 962	9 281
Bobinage	PE+PA	Composite HT	PVC
Moyenne heures bobinage	9 464	2 094	10 236
Nombre de roues	7	7	7
Moyenne heure nombre de roues	10 492	10 492	10 492
Corrosivité	corrosive	corrosive	corrosive
Moyenne heure corrosivité	9 117	9 117	9 117
Matériau du tubage	PVC	PVC	PVC
Moyenne heures matériau tubage	10 658	10 658	10 658
Moyenne heures forage	9 610	9 610	9 610
MOYENNE D'HEURES PROJETEE	10 593	7 740	8 412
DUREE DE VIE ESTIMEE (Années)	3,26	2,43	2,57

ETUDE ECONOMIQUE

Invest. (acquisit* +instal*) sans jupe	5 009 €	7 187 €	6 443 €
Durée de vie probable (an) modélisée	3,26	2,43	2,57
Amortissement annuel (€/an) en considérant la durée de vie projetée	14 235 €	15 180 €	15 928 €
Amortissement annuel (€/an) en considérant durée de vie de 5 ans	13 699 €	13 663 €	14 705 €
Amortissement annuel (€/an) en considérant la durée de vie projetée et la jupe si elle était nécessaire	14 356 €	15 180 €	15 928 €

Annexe 32 : Test de l'influence des coefficients de pondération sur l'outil d'estimation de la durée de vie des motopompes

Gamme de la pompe	Coefficients de pondération de l'essai										Somme des carrés des écarts	Écart relatif par rapport à la situation équilibrée	
	Gamme du moteur	Matériau des roues	Matériau de l'isolant du bobinage	Nombre de roues	Corrosivité	Tubage	Forage	Somme des coefficients					
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	8	2 084 119	0,0%
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9	2 125 806	2,0%
1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9	2 115 547	1,5%
1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	9	2 098 508	0,7%
1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	9	2 125 460	2,0%
1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	9	2 040 055	-2,1%
1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	9	2 107 239	1,1%
1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	9	2 138 610	2,6%
1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	9	1 926 140	-7,6%
1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	2	10	1 903 385	-8,7%
1	1	1	1	4	1	1	1	1	1	4	14	1 706 982	-18,1%
1	1	1	1	5	1	1	1	1	1	4	15	1 706 863	-18,1%
1	1	1	1	4	1	1	1	1	1	5	15	1 644 035	-21,1%
1	1	1	1	4	1	1	1	1	1	10	20	1 433 069	-31,2%
1	1	1	1	10	1	1	1	1	1	25	41	1 253 684	-39,8%

  	
<p>MÉMOIRE DE TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES</p> <p>Diplôme d'ingénieure ENGEES – formation par apprentissage</p> <p>Spécialité hydrosystèmes souterrains</p>	
MAILLAND Pauline	2019
<p>Optimisation de la durée de vie des groupes motopompes de forages</p> <p>Étude de cas à la Société des Eaux de l'Est à CREUTZWALD (Moselle)</p>	
<p>Nombre de pages : 64 pages de texte et 38 pages d'annexes</p>	
<p>Nombre de références bibliographiques : 36</p>	
<p>Structure d'accueil :</p> <p>Société des Eaux de l'Est Zone Actisud 18, rue Saint Louis 57 150 CREUTZWALD</p> <p>Superviseur de travail de fin d'études : FABACHER Florian</p>	
<p>Résumé :</p> <p>La Société des Eaux de l'Est (SEE) possède 65 forages qui lui permettent d'alimenter en eau les industriels de la plateforme industrielle de Carling (Moselle). Les groupes de pompage immergés équipant ces forages vieillissent rapidement. La SEE s'est demandée comment optimiser la durée de vie des motopompes tout en maîtrisant les coûts.</p> <p>Des recherches bibliographiques, un état des lieux du patrimoine et une analyse statistique ont permis de proposer des pistes d'amélioration à la SEE.</p> <p>Enfin, un outil d'aide à la décision existant a été complété avec des critères techniques afin de prendre en compte les retours d'expérience de la SEE et d'affiner le calcul du coût global.</p>	
<p>Mots-clés : analyse statistique, coût global, défaut d'isolement, forages, motopompes immergées, qualité d'eau, vieillissement.</p>	