

Mise en œuvre de la simulation numérique dans la conception intégrée des pompes hydrauliques

F.MAURICE^{a,b}, LC.POREL^b, E.NOPPE^a, Z.CHERFI-BOULANGER^a,
B.EYNARD^a

a-Université de Technologie de Compiègne, Laboratoire Roberval UMR CNRS 7337, CS 60319, 60203 Compiègne Cedex, France.

franck.maurice@utc.fr, benoit.eynard@utc.fr, zohra.cherfi-boulanger@utc.fr,
eric.noppe@utc.fr

b-HYDRO LEDUC, Allée René LEDUC, 54122 Azérailles, France.

fmaurice@hydroleduc.com, lcporel@hydroleduc.com

Résumé :

L'augmentation du prix de l'énergie, les contraintes environnementales ainsi que les exigences du marché mondial imposent aux fabricants d'équipements hydrauliques de produire des composants toujours plus compétitifs et de plus en plus performants. Face à ces exigences l'innovation est primordiale. La recherche et le développement ayant pour vocation la mise en œuvre de solutions nouvelles ainsi que la compréhension des phénomènes physiques constituent la véritable pierre angulaire de la discipline. Le développement conventionnel d'une pompe fait appel à la méthode expérimentale essais-erreurs avec itérations successives longues et coûteuses. L'intégration de la simulation numérique permet une optimisation des produits par prototypage virtuel tout en réduisant considérablement le coût et le temps de développement. L'objectif de notre travail est d'établir une stratégie de conception et d'optimisation des pompes hydrauliques en utilisant les outils de simulations. Dans cette stratégie, l'insertion des plans d'expériences numériques permet de modéliser les performances d'un système sous la forme de surfaces des réponses. Cette modélisation donne accès aux configurations de paramètres de conception qui minimisent ou maximisent un critère de performance.

Abstract:

Energy cost rise, environmental constraints as well as global market requirements urge hydraulic manufacturers to improve their product in order to remain competitive. In front of these requirements, innovation has become the mainstream.

Conventional pumps designing use a strategy based on "test-error" iterations. This way is expensive in terms of manufacturing cost and time. Numerical simulation implementation enables to improve pump's design by virtual prototyping. This sharply decreases time development.

Our work aims to establish a conception and optimization strategy using numerical simulations. By implementing Design of Experiments, response surfaces can be drawn. These latter give the design parameters configuration that minimise or maximise a performance criterion.

Mots Clefs : hydraulique de puissance, hydromécanique, pompes à pistons, simulation numérique, conception mécanique, Plans d'expériences numériques.

1 Introduction

La discipline de l'hydraulique de puissance est omniprésente dans de nombreuses applications. Elle constitue une solution incontournable pour toutes les utilisations qui nécessitent des puissances élevées. Son champ d'application s'étend à de nombreux domaines tels que les transports de biens et de personnes, les travaux publics, les machines agricoles ainsi que les machines-outils. Les générateurs de débit sont le véritable cœur de tous les circuits hydrauliques. Il existe sur le marché plusieurs technologies de pompes hydrauliques, à savoir les pompes à pistons, à engrenages, à palettes et à vis. Les pompes à pistons sont des produits à haute valeur ajoutée, en comparaison avec les autres technologies. Elles sont les plus performantes du marché. Dotées d'une puissance massique inégalable, elles sont capables de travailler à des pressions élevées tout en maintenant un haut rendement global. La famille des pompes à pistons se décline en plusieurs sous-ensembles de technologies plus ou moins différents. Il s'agit des pompes à pistons axiaux, à pistons sphériques aussi connues sous le nom d'axe brisé ainsi que celles à pistons radiaux.

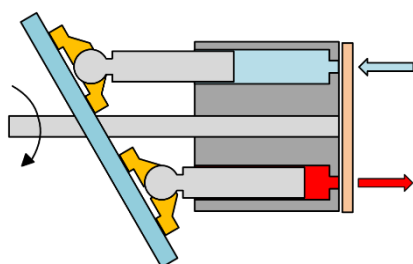


Figure 1 Pompe à pistons axiaux

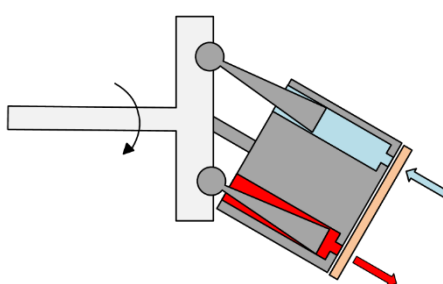


Figure 2 Pompe à pistons sphériques

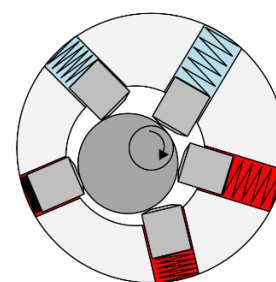


Figure 3 Pompe à pistons radiaux

La grande variété d'applications dans lesquelles l'hydraulique de puissance est mise en œuvre implique des besoins toujours plus importants en termes de puissance massique. De même, les contraintes environnementales ainsi que l'augmentation du prix de l'énergie font croître la demande en composants toujours plus performants et ayant des rendements élevés. Afin de rester compétitif, les fabricants de composants hydrauliques sont contraints de répondre à ces nouvelles exigences tout en contrôlant leurs coûts de fabrication. L'augmentation de la puissance de calcul des ordinateurs ainsi que le développement d'outils informatiques font de la simulation numérique un élément clef de l'innovation et du développement de produits. Les pompes à pistons font l'objet de nombreuses recherches dédiées à la compréhension des phénomènes physiques ou à l'amélioration de leurs performances. Par exemple, les travaux de J.M Bergada et al [1] proposent une analyse complète des fuites internes ainsi que de l'irrégularité du débit. G. Zeiger et A. Akers [2] donnent un modèle mathématique du couple induit par la résultante des efforts des pistons sur le plateau. G. Liu et al [3] améliorent les performances d'une pompe à pistons axiaux par une démarche d'optimisation multidisciplinaire de la conception (MDO). K. Harrison et K. Edge [4] mettent en œuvre un système intégré à la glace de distribution permettant de réduire le bruit. M. Kunkis et J. Weber [5] réalisent une étude expérimentale et numérique sur la vitesse limite de rotation d'une pompe à pistons axiaux. J. Baker et M. Ivantysynova [6] ont montré qu'une surface composée de microstructures ondulées sur la glace de distribution permet de réduire les frottements visqueux augmentant ainsi le rendement global de l'ordre de 2% à 10%. Enfin, I. Cho [7] détermine les paramètres qui maximisent la résistance mécanique d'une glace de distribution en utilisant un plan d'expériences numériques. Ce document s'inscrit dans la démarche de compréhension des phénomènes et d'amélioration des performances des pompes à pistons. Il a pour but de présenter une méthode de conception et d'optimisation par simulations numériques appliquées aux pompes

hydrauliques. Dans la section 2, nous décrirons le fonctionnement d'une pompe à pistons axiaux. Puis nous présenterons dans la section 3 les différentes étapes de la méthode d'optimisation par simulations numériques. Enfin nous ferons la synthèse de notre réflexion et donnerons les perspectives de nos futurs travaux de recherche.

2 Fonctionnement d'une pompe hydraulique à pistons axiaux et à distribution plane

2.1 Description

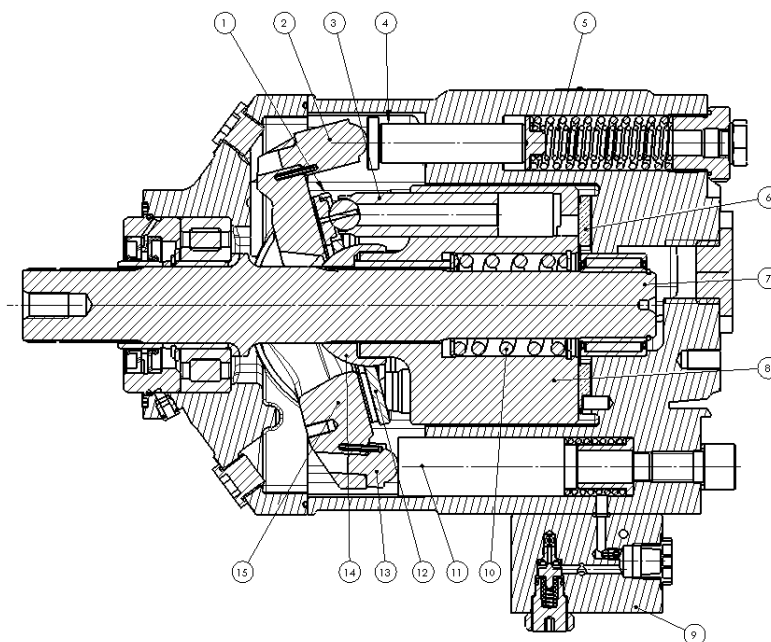


Figure 4 Vue en coupe de la pompe TXV d'origine Hydro Leduc

- Fonctionnement

La pompe à cylindrée variable est une pompe à pistons axiaux et à barillet tournant (cf. Figure 4). Un arbre (7) tourne et entraîne en rotation le barillet (8) contenant les pistons (3). Le plateau (15) non tournant repose sur des coussinets composites autorisant une modification de son angle d'inclinaison. Les pistons reposent sur le plateau par l'intermédiaire d'un appui piston-patin (1). La rotation du barillet par l'arbre d'entraînement provoque le mouvement alternatif des pistons induit par l'inclinaison du plateau. L'aspiration et le refoulement se font au travers de la glace de distribution (6) et le ressort de compression (10) assure le maintien du barillet sur cette dernière. Ce même ressort exerce une force sur la rotule (14) qui prend appui sur la plaque de rappel assurant le maintien des pistons sur le plateau. Le boîtier d'asservissement (9) pouvant être piloté par un distributeur proportionnel permet de contrôler hydrauliquement l'entrée et la sortie des deux vérins (4) et (11) qui sont en appui sur les butées (13) et (2) du plateau. En fonction des besoins du circuit, les vérins sortent ou rentrent dans leurs alésages faisant ainsi varier l'angle d'inclinaison du plateau. Toute modification de l'angle d'inclinaison du plateau entraîne une variation de la cylindrée de la pompe.

2.2 Détermination des paramètres d'importance

Cette partie s'inscrit dans une démarche d'acquisition des connaissances sur le produit à optimiser ou à reconcevoir. Notre objectif est, en s'appuyant sur une campagne d'essais menés sur la pompe, d'établir quels sont les paramètres qui impactent les performances des pompes hydrauliques à pistons.

Ci-dessous est représenté le montage de la pompe sur un banc d'essais :

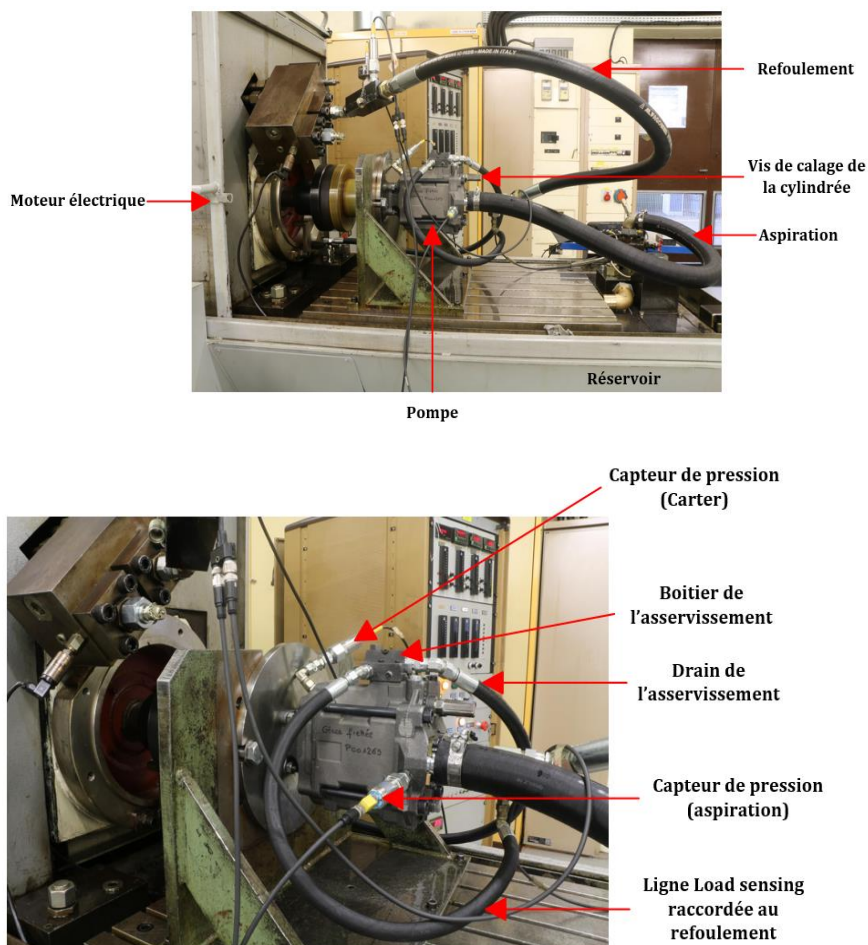


Figure 5 Montage de la pompe sur un banc d'essais

Les courbes caractéristiques que nous avons obtenues sont les suivantes :

- Courbes du débit en fonction de la vitesse de rotation (Figure 7)

Elles ont été obtenues pour différentes pressions d'aspiration et pour différentes cylindrées de la pompe allant de 50 à 130 cm³/tr.

- Courbes du débit en fonction de la pression de refoulement (Figure 8)

Elles ont permis de rendre compte du rendement volumétrique de la pompe en fonction de la pression de refoulement. Elles ont de même été établies en fonction de la cylindrée de la pompe.

- Courbes d'annulation et de reprise du débit

Pour différentes vitesses de rotation (500, 1000 et 1500 tr/min), et pour différentes pressions de refoulement (de 50 à 350 bar par pas de 50 bar), la pression dans le vérin de pleine cylindrée ainsi que celle dans le vérin d'annulation ont été mesurées au cours de l'annulation (fermeture de la vanne sur le circuit de refoulement) et de la reprise du débit (réouverture de la vanne sur le circuit de refoulement).

Ces campagnes de mesures ont permis de déterminer les vitesses de rotations à partir desquelles la pompe ne peut plus assurer son débit en fonction de la cylindrée et de la pression d'aspiration. Elles ont de même permis d'établir le rendement volumétrique de la pompe en fonction de la pression de refoulement et de la cylindrée de la pompe. Enfin les essais d'annulation et de reprise du débit ont permis

de mesurer le temps de réponse de la pompe ainsi que de mesurer la pression dans le vérin de contrôle (vérin d'annulation).

- Courbes du débit en fonction de la viscosité du fluide hydraulique

Contrairement aux cas précédents, ces essais n'ont pas été réalisés. Cependant il est important de préciser l'influence de la viscosité du fluide hydraulique sur le rendement volumétrique et mécanique. En effet, nous retiendrons que le rendement volumétrique d'une machine tournante diminue lorsque la viscosité du fluide hydraulique devient faible. Cela s'explique par le fait qu'une faible viscosité induit un taux de fuites élevé. A l'inverse plus la viscosité du fluide est élevée et meilleur est le rendement volumétrique. L'effet de la viscosité du fluide hydraulique sur le rendement mécanique est à l'opposé de celui du rendement volumétrique. En effet, plus la viscosité du fluide est faible, et meilleur est le rendement mécanique. A l'inverse plus la viscosité du fluide hydraulique est élevée, et moins bon est le rendement mécanique (les frottements dus aux effets visqueux augmentent).

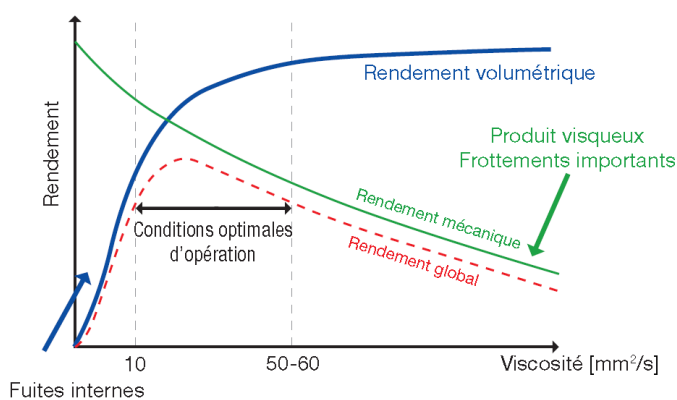


Figure 6 Illustration de l'évolution du rendement volumétrique et mécanique en fonction de la viscosité cinématique (« petit graisseur » Total)

De ce fait il existe un intervalle de viscosités cinématiques pour lesquelles les machines tournantes ont un fonctionnement optimum.

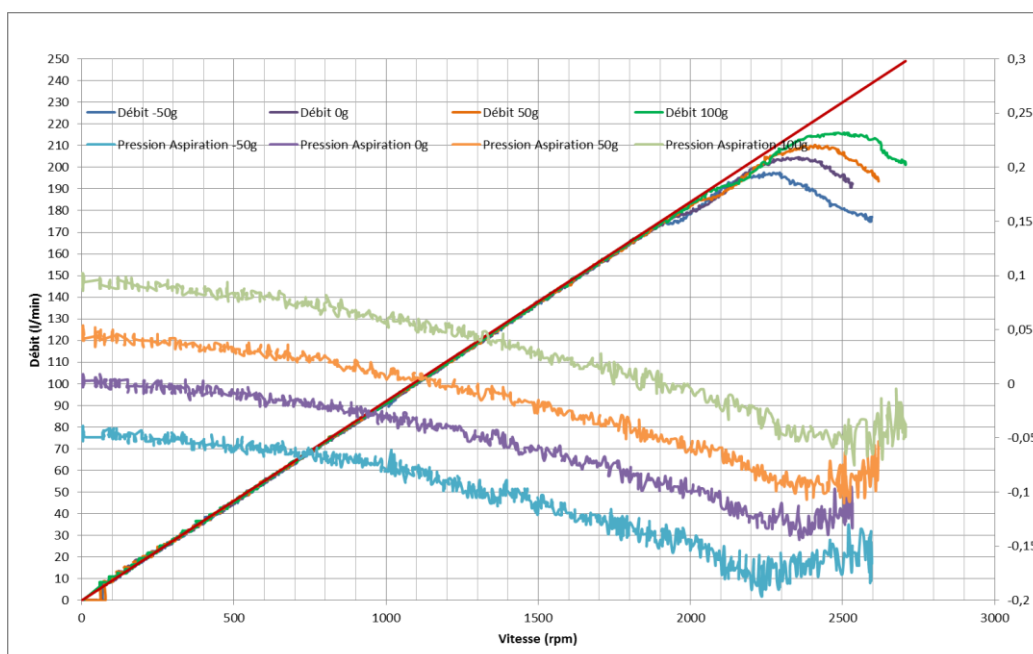


Figure 7 Exemple de mesures de débits en fonction de la vitesse de rotation et de la pression d'aspiration

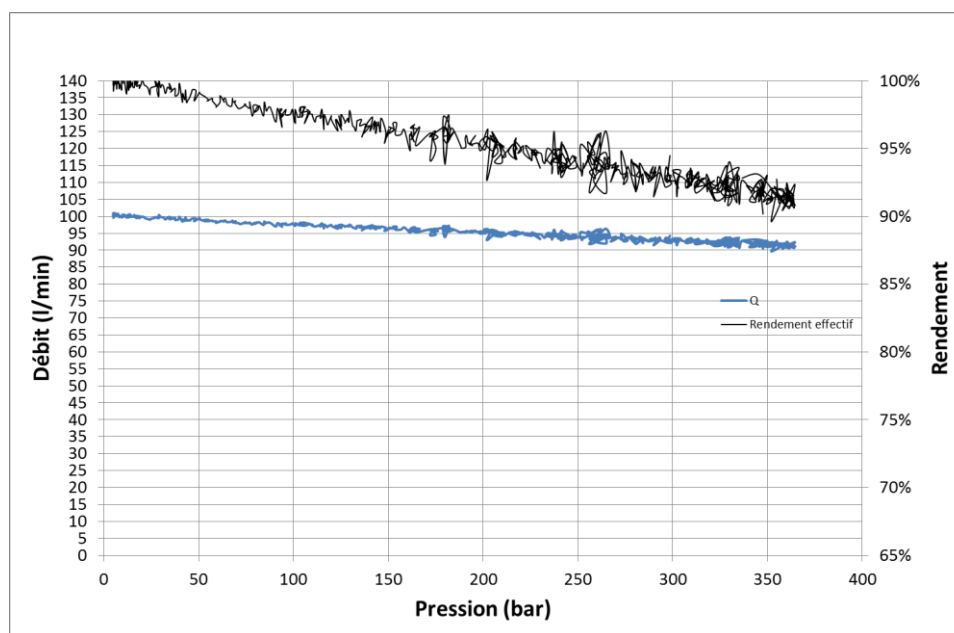


Figure 8 Exemple de mesure du rendement volumétrique en fonction de la pression de refoulement

2.3 Bilan sur les paramètres d'importance

Les enseignements émanant de cette campagne d'essais sont les suivants :

- La pression d'aspiration joue un rôle sur la capacité de la pompe à assurer son débit à des vitesses élevées (au-delà de 1800 tours par minute). Toute diminution de la pression d'aspiration implique une diminution de la vitesse de rotation pour laquelle la pompe est capable d'assurer son débit.
- La cylindrée impacte la capacité de la pompe à assurer son débit à des vitesses de rotation élevées. La pompe calée à 50 cm³ pour une pression d'aspiration égale à la pression atmosphérique ne cavite pas et elle peut assurer son débit au-delà de 2800 tours par minute. En revanche lorsque cette dernière est calée à sa pleine cylindrée (130 cm³), pour une pression d'aspiration égale à la pression atmosphérique, elle ne peut plus assurer son débit à partir de 1800 tours par minute. Ce qui est normal puisque le volume à admettre dans la chambre des pistons est plus faible à 50 cm³ qu'à 130 cm³.
- Les courbes du débit en fonction de la pression de refoulement ont montré que le rendement volumétrique diminue avec l'augmentation de la pression de refoulement. Étant donné que les fuites internes ne dépendent pas de la vitesse de rotation, il a pu être constaté que le rendement volumétrique s'améliore avec l'augmentation de la vitesse de rotation.
- La viscosité du fluide impacte le rendement volumétrique et mécanique. Une viscosité élevée favorise le rendement volumétrique au détriment du rendement mécanique. Inversement une viscosité faible favorise le rendement mécanique au détriment du rendement volumétrique. On peut noter que la température du fluide est étroitement liée à cette notion puisque la viscosité est une fonction de cette dernière. Toute diminution de la température induit une augmentation de la viscosité, inversement, toute augmentation de la température induit une diminution de la viscosité. De même la viscosité dépend de la pression à laquelle le fluide se situe. Toute augmentation de la pression provoque une augmentation de la viscosité de ce dernier.

Le tableau ci-dessous (Tableau 1) synthétise l'analyse sur les paramètres d'importances.

Facteurs	Augmentation/Diminution	Effets
Pression d'aspiration	Augmentation	La pompe peut admettre des vitesses de rotation plus élevées.
	Diminution	Limite la vitesse de rotation pour laquelle la pompe est capable d'assurer son débit
Pression de refoulement	Augmentation	Augmente les fuites et diminue le rendement volumétrique
	Diminution	Diminue les fuites et favorise le rendement volumétrique
Vitesse de rotation	Augmentation	Augmentation du rendement volumétrique
	Diminution	Diminution du rendement volumétrique
Cylindrée	Augmentation	Diminue la capacité de la pompe à assurer son débit à hautes vitesses
	Diminution	Augmente la capacité de la pompe à assurer son débit à hautes vitesses
Viscosité	Augmentation	Diminue le rendement mécanique et augmente le rendement volumétrique
	Diminution	Augmente le rendement mécanique et diminue le rendement volumétrique
Température du fluide	Augmentation	Augmente le rendement mécanique et diminue le rendement volumétrique
	Diminution	Diminue le rendement mécanique et augmente le rendement volumétrique

Tableau 1 Synthèse de l'analyse sur les paramètres d'importance

Nous avons décrit dans cette section, le fonctionnement de la pompe à cylindrée variable d'origine Hydro Leduc. Ses performances ainsi que les paramètres d'importance ont été mis en exergue. La stratégie conventionnelle d'amélioration des pompes hydrauliques à pistons consiste à modifier la conception d'un ou de plusieurs composants (cf. Figure 9). Il s'agit par exemple d'utiliser un autre matériau pour un élément donné, substituer un composant par un autre ou bien modifier sa géométrie.

Un prototype de la pompe comportant la ou les modifications est alors réalisé. Ce prototype est testé sur un banc d'essais afin de mesurer les performances. Si ces dernières se sont améliorées, la modification est mise en œuvre. En revanche, si les modifications n'ont pas montré d'améliorations significatives, elles ne sont pas réalisées. Ce cycle est alors répété jusqu'à obtenir le niveau de performances souhaité.

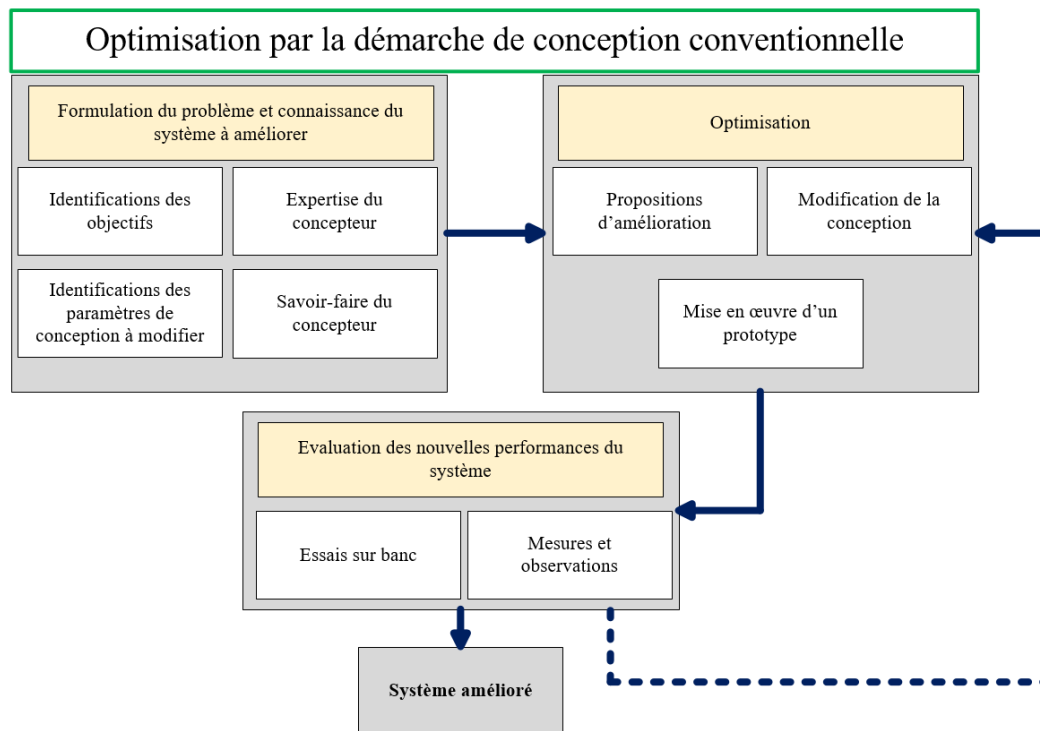


Figure 9 Optimisation par la démarche de conception conventionnelle

Cette stratégie est coûteuse et peut s'avérer particulièrement longue. De plus, elle ne permet pas d'explorer toutes les pistes d'optimisation. En effet, la démarche repose sur l'expérience ainsi que le savoir-faire du concepteur. De ce fait, il est possible que certains paramètres influents n'aient pas été pris en compte pour deux raisons. La première est que certains effets demandent des moyens de mesures très sophistiqués. La seconde est que le savoir acquis au fil des années peut paradoxalement empêcher d'entrevoir l'influence de certains paramètres.

La simulation numérique permet d'accéder à des grandeurs physiques difficilement mesurables voir non mesurables. Elle permet de simuler le comportement d'un système ou d'une de ses parties. Les plans d'expériences permettent d'étudier un grand nombre des facteurs et de leurs interactions et d'identifier lesquels sont les plus influents afin d'en donner la configuration optimale. L'insertion des plans d'expériences dans le cadre de simulations numériques constitue une véritable alternative à la démarche de conception conventionnelle. Nous allons à présent décrire les différentes étapes de notre stratégie d'optimisation.

3 Optimisation de la conception d'une pompe hydraulique

3.1 Méthodologie d'optimisation

La conception par prototypage virtuel implique la réalisation de simulations numériques. Or en fonction de la complexité du problème ainsi que du nombre de configurations que l'on souhaite étudier, ces dernières sont très souvent coûteuses en temps de calcul. De ce fait, au même titre que les expériences physiques, les essais numériques doivent être judicieusement choisis et ordonnés afin d'extraire avec

précision un maximum d'informations. Les outils répondant à cette contrainte sont les plans d'expériences.

La mise en œuvre des plans d'expériences permet la description du comportement d'un système par un modèle mathématique [9]. Ce modèle décrit l'évolution de la réponse en fonction des paramètres d'entrée aussi appelés facteurs. Leur utilisation peut répondre à différents objectifs. On parle de criblage lorsque le nombre de facteurs est élevé et que l'on souhaite déterminer lesquels sont les plus influents sur la réponse [8]. Ils sont aussi utilisés pour créer un modèle mathématique décrivant le comportement d'un système complexe. Dans le cadre de l'amélioration des performances d'un système, ils permettent de déterminer la meilleure configuration de paramètres de conception, on parle alors de plans pour l'optimisation. Enfin, ces derniers peuvent être appliqués pour rendre un système robuste, c'est-à-dire que l'objectif est de définir les configurations pour lesquelles les performances du système sont les moins sensibles aux conditions extérieures.

Les plans destinés à l'optimisation de systèmes s'appuient sur la méthode de surfaces de réponses (MSR). Cette dernière, aussi connue sous le nom anglo-saxon « Response Surface Methodology » (RSM), est la mise en application de techniques mathématiques et statistiques permettant de modéliser les performances d'un système à travers une surface de réponses [10], [11]. A partir d'un plan d'expériences soigneusement choisi, un modèle mathématique du système est estimé. Il représente sous la forme d'une surface, les réponses du système en fonction des différentes combinaisons de paramètres d'entrée. La finalité de la méthode RSM est la localisation d'un extremum sur cette surface. Cet extremum correspond à une configuration de paramètres de conception qui maximisent ou minimisent un critère de performance.

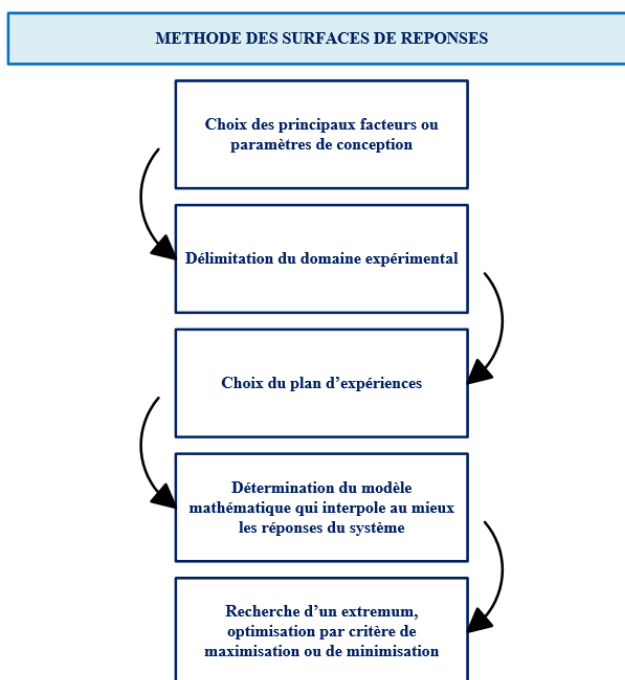


Figure 10 Méthode des surfaces de réponses

[12] La méthode des surfaces de réponses repose sur des modèles polynomiaux du second degré, c'est-à-dire que le modèle définissant le comportement du système s'écrit de la forme :

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i < j} \sum \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \epsilon \quad (1)$$

- y représente la réponse du système.
- x_i, x_j sont les facteurs d'entrée du système, ce sont les paramètres de conception dont on cherche la meilleure configuration.
- $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ sont les coefficients du système, ces derniers sont calculés à partir des résultats des expériences physiques ou numériques.
- ϵ représente l'erreur statistique. La majeure partie des simulations numériques repose sur des modèles déterministes. Dans le cadre des plans d'expériences numériques, cette erreur statistique peut être considérée nulle.

En écriture matricielle, le modèle mathématique s'écrit :

$$y = \beta X + \epsilon \quad (2)$$

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_N \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1p} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2p} \\ 1 & x_{31} & x_{32} & \dots & x_{3p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{np} \end{bmatrix} \quad \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_p \end{bmatrix} \quad (3)$$

Les résultats des essais physiques ou numériques permettent de calculer chacun des coefficients du modèle mathématique donnant les réponses du système en fonction des différentes combinaisons de paramètres d'entrée. Ces coefficients sont calculés à partir de la méthode des moindres carrés dont l'estimateur est donné par l'expression ci-dessous :

$$\hat{\beta} = (X^t X)^{-1} X^t y \quad (4)$$

- $\hat{\beta}$ est le vecteur des coefficients du système.
- X est la matrice des paramètres de conception.
- y est le vecteur des réponses du système.

Quel que soit l'emploi de la méthode des surfaces de réponses, dès que le modèle mathématiques est déterminé, l'étape suivante consiste à estimer la précision du modèle suivant quatre critères d'erreur.

- L'erreur moyenne absolue correspondant à l'écart moyen entre la réponse expérimentale et la réponse issue du modèle.
- L'erreur maximale représentant l'erreur maximale entre la réponse mesurée et celle du modèle.
- La racine carrée de l'erreur moyenne absolue.

$$RSME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (5)$$

- Le coefficient de détermination, noté R^2 dont la valeur est comprise entre 0 et 1. Plus ce coefficient est proche de 1 et plus le modèle est précis.

$$R^2 = \sum_i \frac{(y_i - \hat{y}_i)^2}{(y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (6)$$

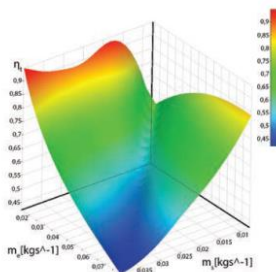


Figure 11 Exemple de surfaces de réponses [11]

La Figure 11 est un exemple de surface de réponses obtenue à partir d'un plan d'expériences numériques dans le but d'optimiser le rendement d'un système de récupération d'énergie [11]. Les zones en rouges décrivent les réponses associées aux paramètres de conception pour lesquelles le rendement est optimum.

Parmi les principaux plans d'expériences utilisés pour les surfaces de réponses, les plus courants sont les plans centraux composites, les plans de Doehlert ainsi que les plans de Box-Behnken [8].

3.2 Bilan et pistes d'amélioration

Par des essais réalisés sur la pompe, nous avons dans la partie 2.3 observé les paramètres d'importance. Ils ont mis en évidence plusieurs axes d'amélioration, à savoir ;

- Amélioration du pouvoir aspirant de la pompe (diminution des volumes morts).
- Retarder la cavitation lors de l'augmentation de la vitesse de rotation de la pompe en fonction de différentes pressions d'aspiration.
- Amélioration du rendement volumétrique (diminution des fuites).
- Amélioration du rendement mécanique (diminution des frottements).
- Limitation de la puissance à fournir aux organes de contrôle de la cylindrée de la pompe, explorer des solutions nouvelles en termes d'asservissement du plateau.

Tous ces points clefs à optimiser doivent répondre à différentes contraintes de fonctionnement définies par le fabricant à savoir ;

- La cylindrée de la pompe
- La pression maximale de refoulement
- La vitesse minimale et la vitesse maximale de rotation
- La viscosité minimale et maximale du fluide hydraulique
- Le rendement volumétrique minimum à la pression de maximale de refoulement, pour une vitesse de rotation ainsi qu'une viscosité du fluide données.
- Le rendement volumétrique minimum à la pression de maximale de refoulement, pour une vitesse de rotation ainsi qu'une viscosité du fluide données.
- Le pouvoir aspirant de la pompe à une vitesse de rotation donnée et à la viscosité maximale du fluide hydraulique
- Le niveau sonore
- Coût de l'amélioration

3.3 Stratégie d'optimisation par simulations numériques

V. Castorani et al [11], présentent une étude basée sur la technique des plans d'expériences numériques pour l'optimisation d'un système de récupération d'énergie. La méthode employée s'effectue suivant trois niveaux d'analyse, à savoir le prototypage virtuel, l'optimisation de la conception ainsi que la validation à partir d'un prototype physique.

Le prototypage virtuel permet de définir le paramétrage principal d'un modèle simplifié et de simuler les performances en fonction de différentes configurations. Dans cette étude, l'approche proposée vise à identifier les effets des paramètres ainsi que des facteurs de bruit sur les résultats expérimentaux. Les plans d'expériences sont utilisés afin de réduire le temps ainsi que le coût de la conception. Les résultats des expériences numériques permettent, par l'utilisation de la méthode des surfaces de réponses (RSM), d'aboutir à un modèle approximatif du système. La localisation de l'extremum donne accès aux paramètres de conception qui maximisent le rendement. La solution est alors validée à partir d'essais sur un prototype physique. Les différentes étapes de l'ensemble de l'analyse sont les suivantes :

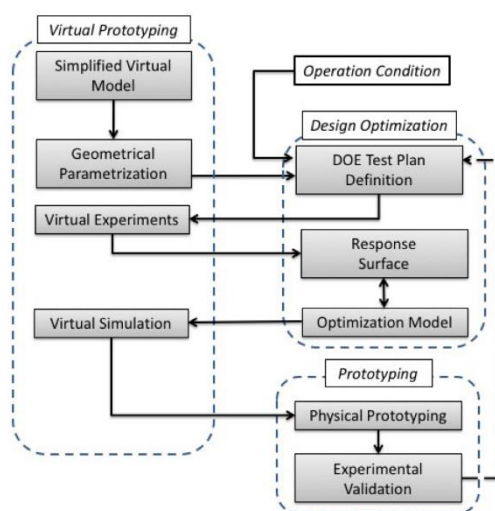


Figure 12 Démarche d'optimisation [11]

- Simplification de la géométrie, élimination des éléments sans influence sur la physique du problème.
- Identification et paramétrage des facteurs
- Réalisation du plan d'expériences
- Surface de réponses et localisation de l'extremum
- Optimisation de la conception
- Validation de la conception optimisée par simulation numérique
- Validation physique

Dans une autre étude, V. Castorani et al [13], présentent une approche d'optimisation multi-objectifs en associant les méthodes des surfaces de réponses (RSM) avec l'intégration CAD (computer Aided design), CAE (Computer Aided Engineering) et DfC (Design for Cost). Il ne s'agit pas seulement de définir la configuration qui maximise les performances du système, mais aussi d'évaluer la solution optimale en termes de coût de fabrication. La méthodologie employée s'articule de la même façon que celle décrite précédemment mais intègre dans son développement la contrainte de coût de fabrication. Cette contrainte est directement incluse dans la phase de prototypage virtuel. Les coûts de fabrication sont calculés en important les données du modèle CAO (géométriques et non géométriques) dans un logiciel DfC (Design for Cost).

G. Berti et M. Monti [14] proposent une nouvelle approche pour l'optimisation du processus de moulage par injection. Elle est basée sur la simulation numérique ainsi que la méthode RSM. Ces outils étant déterministes, afin de considérer les aspects aléatoires du processus, les auteurs intègrent à la méthode d'optimisation la notion de simulations stochastiques.

De manière générale, l'optimisation des performances d'un système par la mise en œuvre de simulations numériques se décline en trois étapes. La première est une phase d'acquisition des connaissances sur le comportement du système ainsi que la définition des objectifs. Les paramètres d'influence et les contraintes doivent être clairement identifiés. Cette étape réalisée, les critères d'optimisation peuvent être ciblés. La méthode des surfaces de réponses est alors mise en œuvre, elle comprend le choix des paramètres de conception, du plan d'expériences, la définition du modèle mathématiques ainsi que sa vérification. Lorsque la précision du modèle est vérifiée, la localisation de l'extremum répondant à un critère de maximisation ou de minimisation permet d'établir la configuration optimale des paramètres de conception. Une nouvelle simulation numérique est alors effectuée afin de valider les performances. La dernière étape est la réalisation d'un prototype optimisé destiné à valider les améliorations par des essais. Dans cette présente partie, nous avons pu définir une méthodologie destinée à l'optimisation des systèmes. L'insertion des plans d'expériences dans le cadre d'essais numériques permet d'aboutir à une configuration optimale en limitant le nombre de simulations réduisant ainsi le coût du développement.

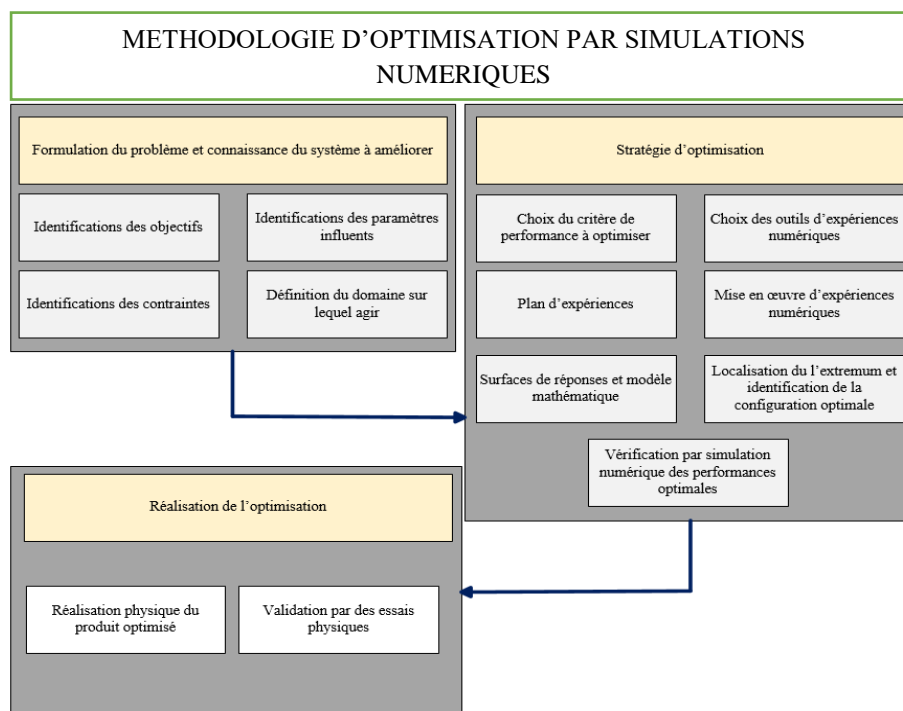


Figure 13 Synthèse de la méthodologie d'optimisation

4 Conclusion et perspectives

Nous avons décrit une stratégie d'optimisation alternative à celle conventionnelle mettant en œuvre les plans d'expériences numériques associés aux méthodes de surfaces de réponses. Nous avons montré l'intérêt de cette démarche en termes de coût et de temps de développement. A travers des essais physiques réalisés sur la pompe à optimiser, les paramètres d'importances ainsi que les axes d'amélioration ont été définis. La poursuite de nos travaux se concentrera sur la mise en œuvre de la méthode d'optimisation. Pour mener à bien notre projet, nous devons orienter nos travaux suivant plusieurs points :

- Augmentation des connaissances sur les outils de modélisation et de simulation numérique des pompes à pistons
- Définition des axes d'améliorations pouvant être résolus par une approche système, locale, ou les deux.
- Modélisation système et locale du comportement de la pompe.
- Analyse et recalage des modèles par les résultats expérimentaux.
- Définition des plans d'expériences à mettre en œuvre en fonction de l'approche choisie.
- Recherche de solutions innovantes pour la reconception de certains éléments de la pompe.

L'un des objectifs de nos travaux précédemment décrits est l'augmentation de la puissance massique de la pompe. M. Kunkis et J. Weber [5] ont montré la possibilité de retarder l'apparition de la cavitation en modifiant la géométrie du conduit d'aspiration de la pompe et celle de la glace de distribution. Cependant, nous n'avons pas rencontré de travaux définissant la configuration optimale d'un dispositif « anti-cavitation ». Ainsi, nous appliquerons la stratégie d'optimisation par simulations numériques associées à des plans d'expériences décrite dans ce document. A partir de paramètres de conception de la glace de distribution, par exemple le nombre de trous, leurs rayons

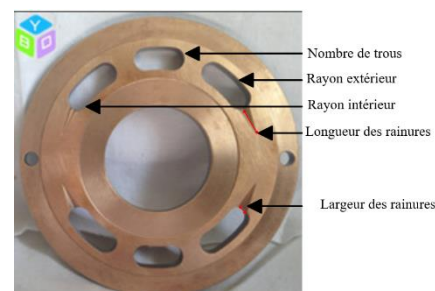


Figure 14 Exemple d'une glace de distribution d'origine Komatsu

extérieurs et intérieurs, la longueur, la largeur et la forme des rainures de pré compression et de décompression, nous définirons la configuration qui minimise l'apparition de la cavitation.

5 Références

- [1] J. Bergada, S. Kumar et J. Watton, «A complete analysis of axial piston pump leakage and output flow ripples,» *Applied Mathematical Modelling* , n° 132, pp. 1731-1751, 2012.
- [2] G. Zeiger et A. Akers, «Torque on the Swashplate of an Axial Piston Pump,» *Journal Of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 107, pp. 220-226, 1985.
- [3] «Multidisciplinary Design Optimization of Swash-Plate Axial Piston Pump,» *Applied Sciences*, vol. 6, pp. 399-413, 2016.
- [4] A.-M. Harrison et K.-A. Edge, «Reduction of axial piston pump pressure ripple,» *Journal of Systems and Control Engineering*, n° 153, pp. 214-226, 2000.
- [5] J. Weber et M. Kunkis, «Experimental and numerical assessment of an axial piston pump's speed limit,» *Fluid Power and Motion Control*, 2016.
- [6] J. Baker et M. Ivantysynova, «Advanced Surface Design for reducing Power Losses in Axial Piston Machines,» chez *11th Scandinavian International Conference on Fluid Power*, Linköping, 2009.
- [7] I. S. Cho, «A study on optimum design for the valve plate of a swash plate-type oil hydraulic piston pump,» *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 6, n°129, pp. 2409-20413, 2015.
- [8] J. Goupy, «Plans d'expériences,» *Mesures - Analyses / Qualité et sécurité au laboratoire*, 1997.
- [9] P. Triboulet, «Notions de bases sur les plans d'expériences,» Chalon sur Saône, 2008.
- [10] A. I.Khuri et S. Mukhopadhyay, «Response surface methodology,» *John Wiley & son, Inc*, vol. 2, pp. 128-149, 2010.
- [11] V. Castorani, D. Landi et M. Germani, «Determination of the optimal configuration of energy recovery ventilator through virtual prototyping and DoE techniques,» *Procedia CIRP* , vol. 50, pp. 52-57, 2016.
- [12] H.-S. Park et X.-P. Dang, *Computer-Aided Design*, vol. 42 , pp. 889-902, 2010 .
- [13] V. Castorani, A. Vita, M. Mandolini et M. Germani, «A CAD-based method for multi-objectives optimization of mechanical products».
- [14] G. Berti et Manuel Monti, «A virtual prototyping environment for robust design of an injection moulding process,» *Computers and Chemical Engineering*, pp. 159-169, 2013.