

UNIVERSITE ASSANE SECK DE ZIGUINCHOR



UFR : SCIENCES ET TECHNOLOGIES
Département de MATHEMATIQUES

MEMOIRE de MASTER

présenté par : **LAMINE CISSE**

En vue de l'obtention du diplôme de : **MASTER de
MATHEMATIQUES et APPLICATIONS**

Spécialité : **MATHEMATIQUES APPLIQUEES**

Titre :

OPTIMISATION NON LINEAIRE DES CONVERTISSEURS D'ENERGIE DES VAGUES

Soutenu publiquement le 27 Novembre 2021, devant le jury
composé de :

Président	Clément MANGA	Professeur Assimilé UASZ
Examineurs	Emmanuel Nicolas CABRAL	Maitre de Conférence UASZ
	Moussa FALL	Maitre de Conférence Assimilé UASZ
Directeur de mémoire	Edouard DIOUF	Professeur Assimilé UASZ

"...Une bonne partie des mathématiques devenues utiles se sont développées sans aucun désir d'être utile, dans une situation où personne ne pouvait savoir dans quels domaines elles deviendraient utiles. Il n'y avait aucune indication générale qu'elles deviendraient utiles. C'est vrai de toute la science ":

John Von Neumann

REMERCIEMENTS

Louange à ALLAH Le TOUT PUISSANT de m'avoir donné la santé, la volonté, le courage et la patience afin de pouvoir réaliser ce travail de recherche. Je tiens à remercier tous les professeurs de l'Université Assane Seck de ziguinchor , particulièrement, ceux du département de Mathématiques, qui nous ont initié et donné les bases de l'étude Mathématiques pour exceller dans ce domaine. Je tiens à remercier mon directeur de mémoire, le Professeur Edouard DIOUF, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

J'exprime ma gratitude au président du jury, le Professeur Clément MANGA, qui a accepté de présider ce jury et d'apporter sa contribution pour la présentation de ce mémoire, ainsi qu'à tous les membres du jury, en l'occurrence le Docteur Emmanuel Nicolas CABRAL et le Docteur Moussa FALL .

J'adresse mes sincères remerciements à toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques m'ont guidé dans mes recherches.

J'exprime ma reconnaissance envers mes amis et collègues qui m'ont apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long de ma démarche.

DEDICACES

Je dédie ce travail

À vous mes parents, particulièrement à ma mère, pour votre soutien.

À toi ma tante , Soucouta Mané , pour ton aide et ta participation à ma réussite.

À vous mes freres, pour votre soutien.

À toi ma tendre épouse Mariama Diallo, pour tes encouragements.

À toute personne qui occupe une place dans mon coeur.

Table des matières

I	Introduction	6
II	Modèle dynamique du système WEC non linéaire	8
III	Étude du cas d'une bouée dans une vague régulière	12
IV	Optimisation à l'aide d'algorithmes génétiques	17
	IV.1 Algorithme génétique des gènes cachés	19
	IV.2 Cas d'une bouée dans une vague régulière	21
	IV.3 Cas d'une bouée conique	25
V	Optimisation des WEC en ondes irrégulières	28
VI	Discussion	29
VII	Conclusion	38
VIII	Perspectives	39

Définition et Nomenclature :

WEC : (wave energy converters) : convertisseurs d'énergie des vagues.

Bouée : dispositif flottant sur l'eau. La flottaison est obtenue suivant le principe de la poussée d'Archimède.

BEM : Boundary Elements Method (méthode des éléments de frontière) est une méthode de résolution numérique . Elle se présente comme une alternative à la méthode des éléments finis pour les domaines de modélisation infinis.

Tangage : c'est un mouvement de rotation autour de l'axe transversal d'un objet en mouvement.

PTO : power take-off (prise de puissance), est une pièce mécanique permettant de transmettre le couple d'un moteur à un outil mécanique.

CFD : (computation fluid dynamic) mécanique des fluides numériques.

force de froude-krylov : c'est une force hydrodynamique introduite par le champ de pression instable générée par des vagues non perturbées.

PD : (Proportional-Derivative) : dérivée proportionnelle.

Intérêt et Motivation du sujet :

L'énergie des vagues ou houlomotrices transforme le mouvement des vagues en électricité. Les technologies pour capter cette énergie renouvelable et prométeuse sont encore à un stade expérimental, mais de nombreux projets sont déjà à l'étude afin d'en faire l'un des piliers de la transformation énergétique.

Produire de l'électricité grâce à l'énergie créée par le mouvement des vagues, voilà le concept de l'énergie des vagues. De nombreux dispositifs existent pour capter l'énergie des vagues. Parmi ces appareils, on a les corps flottants, des bouées placées perpendiculairement aux vagues. La pression hydraulique issue de la résistance du mouvement des vagues est convertie en électricité.

RESUME

Dans ce travail d'initiation à la recherche, nous présentons une approche d'optimisation pour le contrôle des convertisseurs d'énergie des vagues (WEC) . La méthode d'optimisation proposée offre la possibilité d'optimiser les non-linéarités du système, telles qu'en raison de la forme de la bouée, l'énergie récoltée est maximisée. Les coefficients de la série de puissance dans les forces de commande et du système sont optimisés. L'algorithme génétique des gènes cachés est utilisé pour l'optimisation. La force non linéaire du système optimisé est supposée guider la conception du WEC. Les cas de tests numériques présentés dans ce mémoire montrent qu'il est possible d'atteindre plusieurs fois l'énergie récupérée lors de l'utilisation de l'optimisation de contrôle non linéaire. L'avantage de pouvoir optimiser la conception du WEC simultanément avec le contrôle est le fait de pouvoir récolter cette énergie sans provoquer un mouvement important du WEC, avec une dépendance moindre de la puissance réactive. La mise en œuvre du contrôle obtenu en temps réel est discutée à la fin du document.

I Introduction

L'un des défis de la récupération de l'énergie des vagues est le contrôle du mouvement de la bouée. Il y a eu des développements significatifs sur différentes méthodes de contrôle pour le convertisseur d'énergie des vagues (WECs)[1]. La plupart des études sur le contrôle des WEC, avec un degré de liberté élevé, adoptent un modèle dynamique linéaire, comme l'équation de Cummins qui s'écrit :

$$(m + \tilde{a}_\infty)\ddot{z} = f_{ex} + u - B_v\dot{z} - kz + f_r \quad (1)$$

où z est le déplacement en hauteur, m est la masse de la bouée, k est la rigidité hydrostatique due à la flottabilité, \tilde{a}_∞ est la masse ajoutée à l'infini, f_{ex} est la force d'excitation, u est la force de commande, B est un amortissement visqueux et f_r est la force d'amortissement du rayonnement. La flottabilité raide est appelée force hydrostatique. Ceci est un modèle linéaire et est généralement mis en œuvre à l'aide de méthodes d'élément de frontière (BEM) pour des petits mouvements autour de la position moyenne. Cependant, il existe de multiples sources de non-linéarités possibles dans le modèle dynamique du WEC [2]. Par exemple, si la forme de la bouée n'est pas un cylindre vertical près de la surface de l'eau, alors la force hydrostatique sera non linéaire. Le couplage entre le mode de soulèvement et de tangage dans un absorbeur ponctuel est non linéaire [3]. Les forces hydrodynamiques peuvent être également non linéaires dans le cas d'un mouvement de grande amplitude [4]. Les stratégies de contrôle visant à maximiser l'énergie récoltée augmentent l'amplitude du mouvement et donc l'impact de ces linéarités. Certains auteurs [4] présentent une analyse optique des forces hydrodynamiques non linéaires à différents niveaux à partir d'un modèle non linéaire complet en appliquant les outils de la dynamique des fluides numériques (CFD), aux modèles linéaires corrigés par la force non linéaire de FroudeKrylov, ainsi que des forces visqueuses et hydrostatiques non linéaires. Le (PTO) peut aussi avoir des non-linéarités [5]. Retes et Al [6] soulignent que parmi différents systèmes de convertisseurs d'énergie des vagues (WEC), on choisit uniquement les effets non linéaires pertinents pour éviter des coûts de calcul. Par exemple, dans le cas de l'absorption de points de soulèvement, la force non linéaire de FroudeKrylov est essentielle. La diffraction et le rayonnement peuvent être négligés.

Les effets visqueux non linéaires sont également faibles pour les absorbeurs ponctuels [6]. Les effets de prise de force et d'amarrage semblent être importants. Merigaud et al [7] montrent les non-linéarités dans le cas d'un absorbeur à point de gonflement à la section transversale de la surface non uniforme. Giorgi [8] examine des modèles linéaires représentatifs qui fournissent un modèle moyen sur tout l'espace opérationnel. Ces modèles sont plus précis que les modèles linéaires dans le cas des grands mouvements. Cependant, en raison de la nature moyenne de ces modèles représentatifs, ils ne sont pas très utiles pour contrôler un WEC en grand mouvement. Linéariser le mouvement du WEC autour d'un point d'opération n'est pas toujours réalisable du fait que les vagues de l'océan changent de

caractéristiques continuellement.

Penalba et Al [9] soulignent que pour le contrôle WEC dans le cas de mouvements importants, les modèles doivent être non linéaires. Giorgi et Ringwood [10] présentent une méthode numérique efficace pour calculer les forces de Froude-Krylov en statiques et en dynamiques. La première méthode suppose que la longueur d’onde est considérablement plus longue que la longueur caractéristique de l’appareil et ignore la dépendance de la pression (à la surface de la bouée) sur la montée en puissance. La seconde méthode utilise une extension de McLaurin pour simplifier le calcul de la force intégrale. Cette dernière méthode s’est révélée être plus précise pour divers états de la mer. La plupart des études décrites ci-dessus considèrent différentes modélisation non-linéaires d’un WEC. Certains [10] trouvent que l’énergie récupérée du WEC non linéaire est inférieure à celle du système linéaire, surtout lorsqu’on utilise un contrôle de verrouillage [11]. Cependant, les systèmes non linéaires, possèdent certaines caractéristiques qui peuvent être exploitées en prenant en compte une grande quantité d’énergie, comme indiqué dans la référence [12]. Le but ici n’est pas de modéliser les non-linéarités dans le système. L’objectif est plutôt d’augmenter l’énergie récupérée du WEC non linéaire par rapport au linéaire. Un moyen d’augmenter l’énergie récoltée d’un WEC non linéaire est de concevoir un contrôleur pour le WEC non linéaire ; autrement dit, le processus d’optimisation du contrôle de zonage doit prendre en compte les non-linéarités dans le WEC, permettant ainsi à la force de contrôle d’être une fonction non linéaire des états du système. L’énergie peut encore être augmentée si, en plus d’optimiser le contrôle, nous optimisons les non-linéarités du système simultanément avec le contrôle. La force non linéaire de Froude-Krylov, par exemple, est dictée par la forme de la bouée. Cette dernière peut ainsi être optimisée avec le contrôle pour maximiser l’énergie. La force de Froude-Krylov est une source des non linéarités du système.

Dans ce mémoire, les forces hydrodynamiques et hydrostatiques avec toutes les autres forces non linéaires optimisables sont appelées les non-linéarités du système. Pour le contrôle, il est commode d’exprimer le caractère optimisable des non-linéarités du système en série :

$$\tilde{f}_s = \sum_{i=1}^{N_s} \alpha_{s_i} \dot{z}^i + \sum_{j=1}^{M_s} \beta_{s_j} |\dot{z}^j| \text{sign}(\dot{z}) \quad (2)$$

où \tilde{f}_s est la force non linéaire, α_{s_i} et β_{s_j} sont des constantes, $\forall i$; N_s et M_s sont les nombres de termes non linéaires qui déterminent l’ordre des forces non linéaires.

L’équation (2) est un exemple de contrôles proportionnels dérivés (PD) utilisés dans les systèmes linéaires. Dans une commande PD, la partie proportionnelle est considérée comme terme linéaire dans l’état, et le terme dérivé est construit comme un terme linéaire dans la dérivée d’état. Le terme proportionnel est une raideur, car il a un effet de ressort, ce qui signifie que cette partie de la force n’est

pas ajoutée / enlevée de l'énergie en moyenne. Le terme dérivé cependant, est un terme semblable à un amortisseur qui ajoute / supprime continuellement le courant. On pourrait penser à des termes de raideur non linéaires ou d'amortissement, comme indiqué en détails dans plusieurs références [12]. Le premier terme en \tilde{f}_s représente une force de rigidité non linéaire et le second terme contient une force d'amortissement non linéaire. Notez que tous les s_j sont toujours des coefficients négatifs, le deuxième terme est donc toujours un terme d'amortissement (le flux d'énergie est toujours de l'eau à l'appareil).

Optimiser les non-linéarités du système signifie, dans ce cas, trouver les coefficients optimaux α_{s_i} et β_{s_j} . Une fois que le contrôle et \tilde{f}_s sont optimisés, le système WEC (par exemple, la forme de la bouée) est conçu pour que la force non linéaire du WEC corresponde à la force non linéaire optimisée \tilde{f}_s . Cette dernière étape de la conception du système de WEC pour générer une force non linéaire prescrite n'est pas traitée dans ce travail ; l'objet de ce papier est l'optimisation de la \tilde{f}_s et son contrôle. C'est ainsi que dans un premier temps, nous présentons une étude générale du modèle dynamique du WEC.

Ainsi dans la section III, il est question d'une étude de cas sur une bouée à vague régulière.

L'un des buts recherchés dans ce travail de recherche est l'optimisation à l'aide d'algorithmes génétiques. En effet, c'est ce qui constitue la section V dans laquelle, nous donnerons quelques exemples de cas particuliers. Avant de conclure, nous procéderons à des discussions et commentaires sur les résultats obtenus.

II Modèle dynamique du système WEC non linéaire

Cette section présente le modèle dynamique utilisé pour approximer un WEC non linéaire. Le but recherché est de contrôler les non-linéarités. Celles-ci pourraient être dues à la forme de la bouée, aux mouvements importants et / ou la prise de force. Pour modéliser un WEC non linéaire, on commence par une approximation linéaire de la bouée à une hauteur h , c'est le modèle de base. Nous commencerons dans cette section par le cas d'une vague régulière. Dans le cas d'un WEC linéaire, la force de radiation se réduit à un amortissement linéaire et à un terme de masse ajouté. L'équation de mouvement déduit de l'équation (1) devient alors :

$$(m + \tilde{a})\ddot{z} + (c + B_v)\dot{z} - kz = f_{ex} + u \quad (3)$$

où c est le coefficient d'amortissement des radiations et \tilde{a} la masse ajoutée à la fréquence d'excitation. La force d'excitation dans ce cas peut être écrite sous la forme :

$$f_{ex} = \hat{f} \cos(\Omega t + \phi) \quad (4)$$

où Ω est la fréquence de la force d'excitation, \hat{f} est l'amplitude de la force d'excitation, et ϕ est la phase de la force d'excitation. Considérons maintenant le cas d'un WEC non linéaire dans lequel la force non linéaire supplémentaire, comparée au modèle de base dans l'équation (3), est \tilde{f}_s . La force non linéaire \tilde{f}_s est exprimée comme dans l'équation (2). La force de contrôle est sous la forme d'une somme de deux quantités $u = u_l - \tilde{u}_c$, où u_l est la partie linéaire du contrôle, et \tilde{u}_c est la partie du contrôle non linéaire avec :

$$\tilde{u}_c = \sum_{i=1}^{N_c} \alpha_{c_i} z^i + \sum_{j=1}^{M_c} \beta_{c_j} \dot{z}^j \quad (5)$$

où α_{c_i} , β_{c_i} sont des coefficients constants, $\forall i$, N_c et M_c sont le nombre de termes non linéaires qui déterminent l'ordre des forces de contrôle. L'équation du mouvement du système s'écrit alors :

$$(m + \tilde{a}_\infty) \ddot{z} + B_v \dot{z} + kz = f_{ex} + f_r + u_l + \tilde{u}_c + \tilde{f}_s \quad (6)$$

L'équation du mouvement (équation (6)), est décrite en supposant que la bouée ne laisse pas l'eau entrée ni complètement submergée dans l'eau. Dans le cas du WEC non linéaire présenté dans cet article, le mouvement de la bouée peut grossir et ces deux cas ne doivent pas être exclus. Ainsi, le modèle en équation (6) est modifié comme suit. Considérons la figure 1 avec une plage définie par $\|z\| > z_s$. La limite z_s est sélectionnée en fonction des dimensions de la bouée et la hauteur des vagues. Lorsque $\|z\| > z_s$, il y a deux cas possibles :

Le premier cas est quand ($z > 0$), c'est-à-dire que la bouée est (ou très proche d'être) entièrement submergée sous l'eau.

Le second cas est quand ($z < 0$), c'est-à-dire la bouée est (ou très proche de l'être) totalement hors de l'eau.

Dans ces deux cas, le modèle dynamique dans l'équation (6) n'est pas valide. Une approximation du modèle dynamique est défini ainsi comme suit :

cas 1 : ($z > 0$)

Le terme de rigidité linéaire devient une constante $kh/2$

La force de rigidité non linéaire sera alors saturée, c'est à dire que la force d'excitation décrite en (4) s'écrit :

$$\tilde{f}_s = \sum_{i=1}^{N_s} \alpha_s (h/2)^i + \sum_{j=1}^{M_s} \beta_{s_j} |\dot{z}^j| \text{sign}(\dot{z}).$$

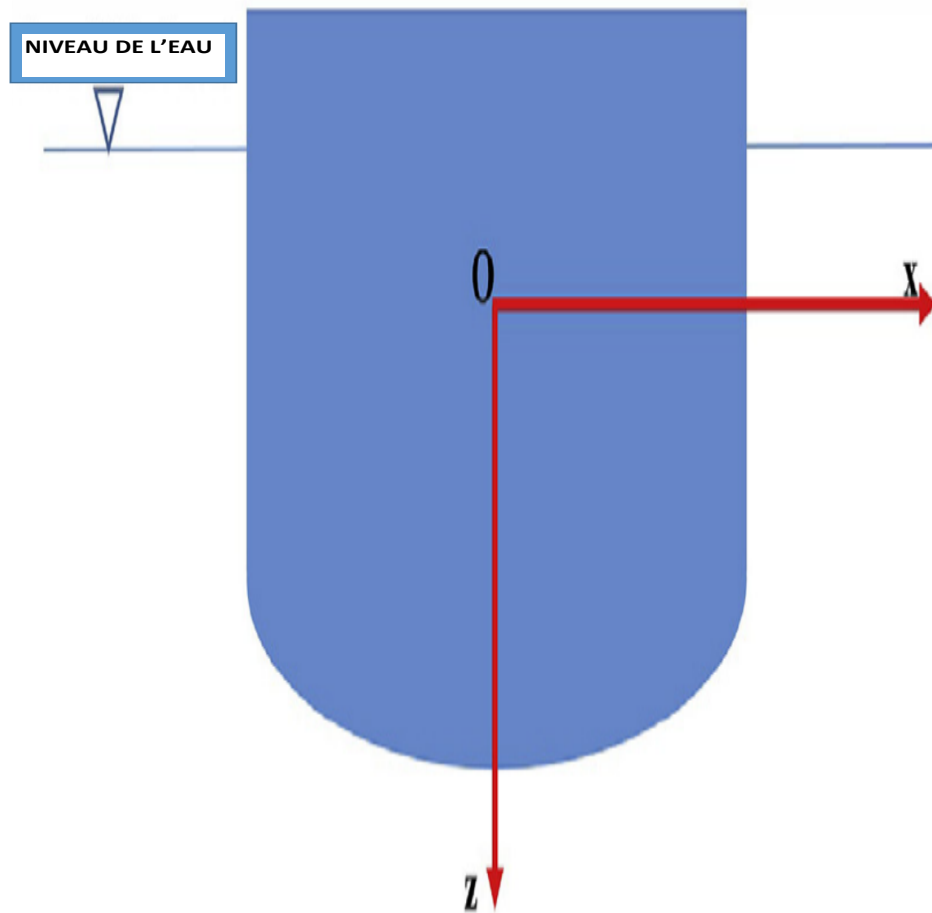


FIGURE 1 – système de coordonnées de la bouée

cas 2 : ($z < 0$) La bouée est hors de l'eau, il n'y a donc pas de force de flottabilité sur elle, ce qui signifie que $kz = -mg$, où g est l'accélération gravitationnelle. Il n'y a pas de force d'excitation agissant sur le WEC ; et aussi pas de terme d'amortissement linéaire dans l'équation (6). Ainsi, la force hydraulique non linéaire disparaît, c'est-à-dire \tilde{f}_s . L'équation du mouvement se réduit à $m\ddot{z} = mg + u_l + \tilde{u}_c$

La puissance récoltée $P(t)$ est exprimée par :

$$p(t) = -(u_c(t) + u_l) \times \dot{z}(t) = -(u) \times \dot{z}(t) \quad (7)$$

Dans l'analyse menée dans cette étude, u_l est supposée être une force d'amortissement c'est-à-dire :

$$u_l = B\dot{z} \quad (8)$$

où B est un coefficient d'amortissement à force de commande linéaire, B est négatif.

L'équation du mouvement dans tous les cas peut-être écrite dans l'espace d'état montré dans l'équation (9) :

$$\begin{bmatrix} \dot{z} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} z \\ \dot{z} \end{bmatrix} + \frac{1}{m} \begin{bmatrix} 0 \\ u_l + \tilde{u}_c + \tilde{f}_s \end{bmatrix} + \frac{1}{m} \begin{bmatrix} 0 \\ f_{ex} + f_r \end{bmatrix} + \frac{1}{m} \begin{bmatrix} 0 \\ G \end{bmatrix} \quad (9)$$

où G est défini par :

$$G = \begin{cases} 0 & \text{si } |z| < z_s \\ -\frac{kh}{2} & \text{si } |z| > z_s, z > 0 \\ mg & \text{si } |z| > z_s, z < 0 \end{cases} \quad (10)$$

La force d'excitation est définie dans l'équation (4), sauf lorsque $z > z_s$ et pour $z < 0$ il disparaît. Le coefficient d'amortissement linéaire est supposé constant dans ce papier. La matrice $[A]$ dans l'équation (9) est définie comme dans l'équation(11) par :

$$[A] = \begin{cases} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{-k}{m} & \frac{-c}{m} \end{bmatrix} & \text{si } |z| < z_s \\ \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} & \text{si } |z| > z_s, \end{cases} \quad (11)$$

Dans le modèle du WEC non linéaire ci-dessus, il existe des coefficients de calcul pour la conception de contrôle dans l'équation (5). Il y a aussi des coefficients

dans l'équation (2) pour la force non linéaire dans le modèle dynamique. Pour des conditions de bouée et de vague données, ces coefficients dans l'équation (2) seront fixés et un processus de conception de contrôle permettrait d'optimiser les coefficients dans l'équation (5) pour des performances optimales. Cependant, dans ce travail, on suppose que la bouée n'est pas encore conçue ; et on essaie ici d'optimiser les deux ensembles de coefficients pour une performance maximale. En d'autres termes, nous essayons d'optimiser le contrôle et les forces non linéaires WEC simultanément. La section 3 présente une étude de cas sur une bouée à vague régulière.

III Étude du cas d'une bouée dans une vague régulière

Cette section présente un exemple numérique illustratif simple. Il met en évidence les avantages pouvant être obtenus lors de l'optimisation à la fois du système et du contrôle des forces non linéaires. Considérons le cas d'un système décrit par Equation (9), qui a des forces non linéaires optimisables. Supposons une masse de bouée de $1,76105kg$, un coefficient de force de rigidité linéaire de $4,5449105kg/s^2$, un coefficient d'amortissement linéaire de $170kg/s$, une force de commande de $4104kg/s$, une amplitude de force d'excitation de $263980N$, sa fréquence de $0,628rad/s$ et sa phase de $0,1rad$. La hauteur de la bouée est supposée être de $7,6m$ et la limite z_s est de $3,4m$. Pour la partie non linéaire, le nombre de termes non linéaires dans la force non linéaire du système est donnée par : $N_s = 4$ et $M_s = 2$.

La valeur non linéaire des coefficients de force hydraulique est :

$$\alpha_s = [0 ; 11556,5594 ; 8565,3620 ; 1296,1921] \quad (12)$$

$$\beta_s = [13925,7309 ; 5500,5422] \quad (13)$$

Le nombre de termes de contrôle est : $N_c = 4$ et $M_c = 3$. Les coefficients de contrôles non linéaires sont :

$$\alpha_c = [0 ; 28593,0676 ; -5996,3414 ; 3211,6816] \quad (14)$$

$$\beta_c = [93730,1448 ; 313067,8210 ; -3451336546] \quad (15)$$

Les simulations sont effectuées pendant $60secondes$. Pour ce cas illustratif, l'énergie extraite du système linéaire (en supposant l'absence de non-linéarité dans le système) est de $3.247588105Joules$, tandis que l'énergie extraite du système non linéaire correspond à $6.615232105Joules$, en $60s$, comme indiqué à la Figure 2.

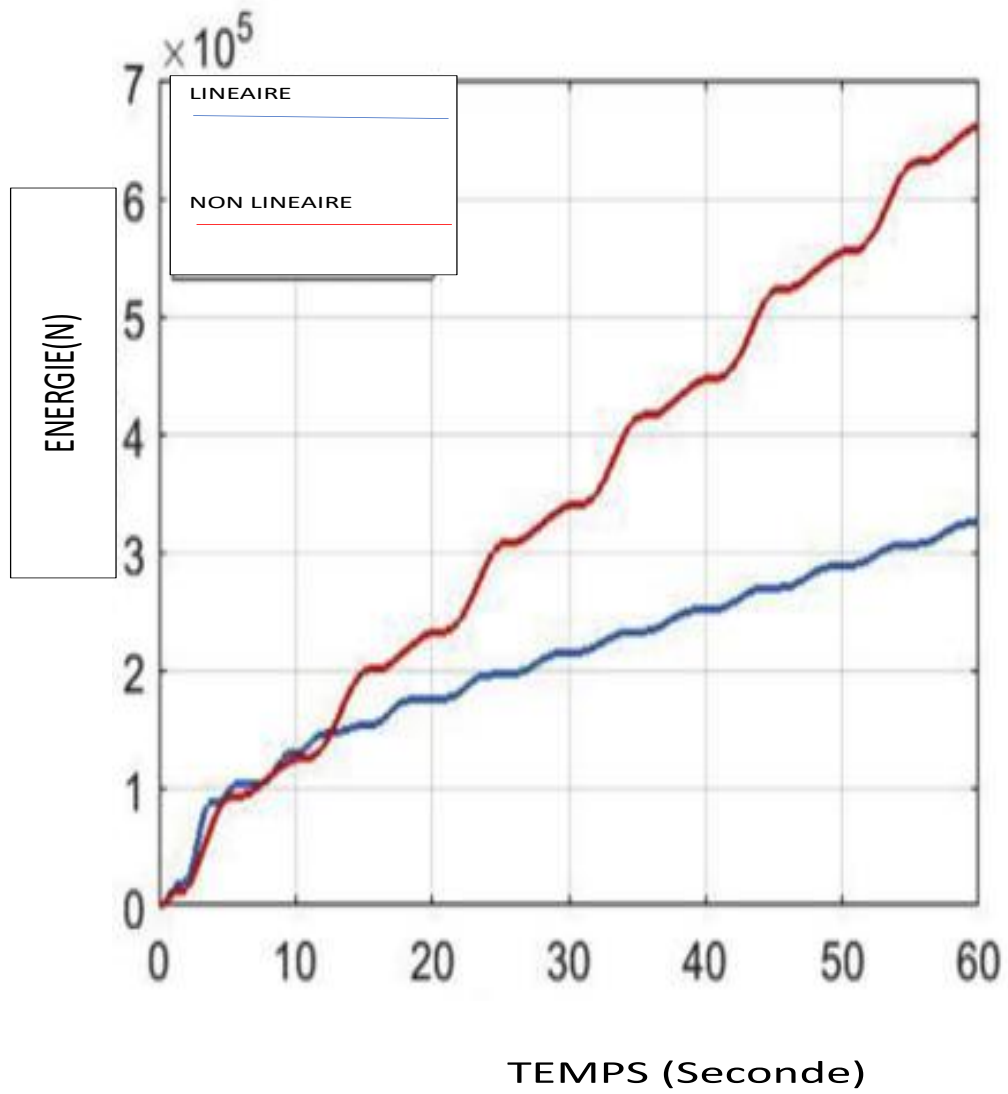


FIGURE 2 – énergie extraite pour le cas 1

Le système non linéaire produit environ 2 fois plus d'énergie récoltée par le système linéaire. La Figure 3 montre la puissance extraite par chaque système. Comme prévu, le système linéaire n'a pas besoin de puissance réactive puisque le contrôle est juste un amortissement linéaire. Le système non linéaire dans ce cas, a besoin de puissance réactive, dont la quantité est très petite bien que comparée à la puissance récoltée, comme le montre la Figure 3 qui met en évidence le niveau de puissance réactive. Notons que la quantité de puissance réactive dicte la taille de stockage de l'énergie nécessaire au système de contrôle. Les conceptions de contrôle qui ont besoin de moins de puissance réactive ont l'avantage de réduire les coûts et moins de complexité par rapport aux stratégies de contrôle qui nécessitent un plus grand stockage d'énergie. La Figure 4 montre le déplacement pour les deux systèmes, où la ligne horizontale en tirets représente la limite z_s au-delà de laquelle la bouée est soit totalement dans les airs, soit totalement submergée.

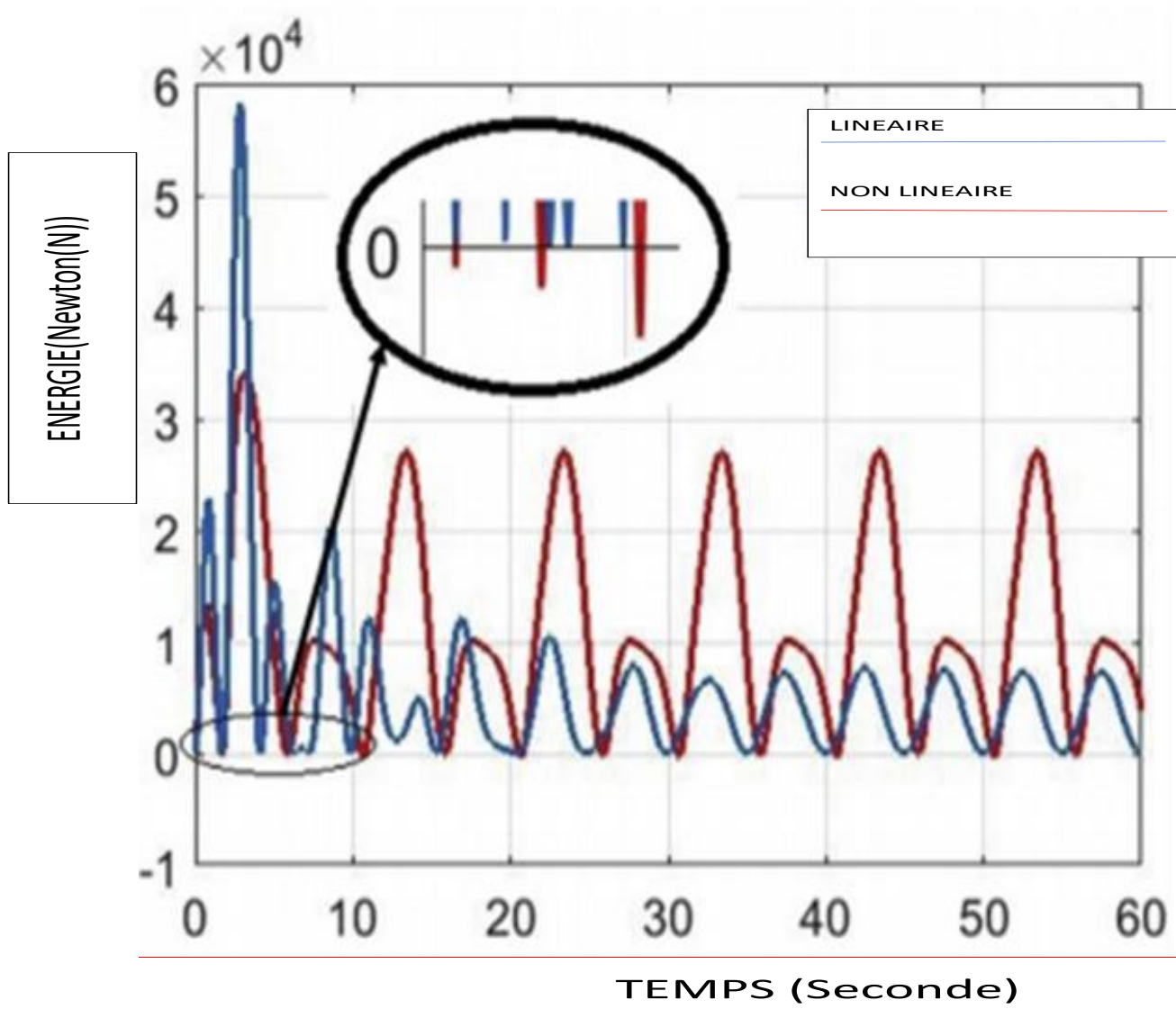


FIGURE 3 – pas de puissance réactive dans les contrôles linéaire et non linéaire

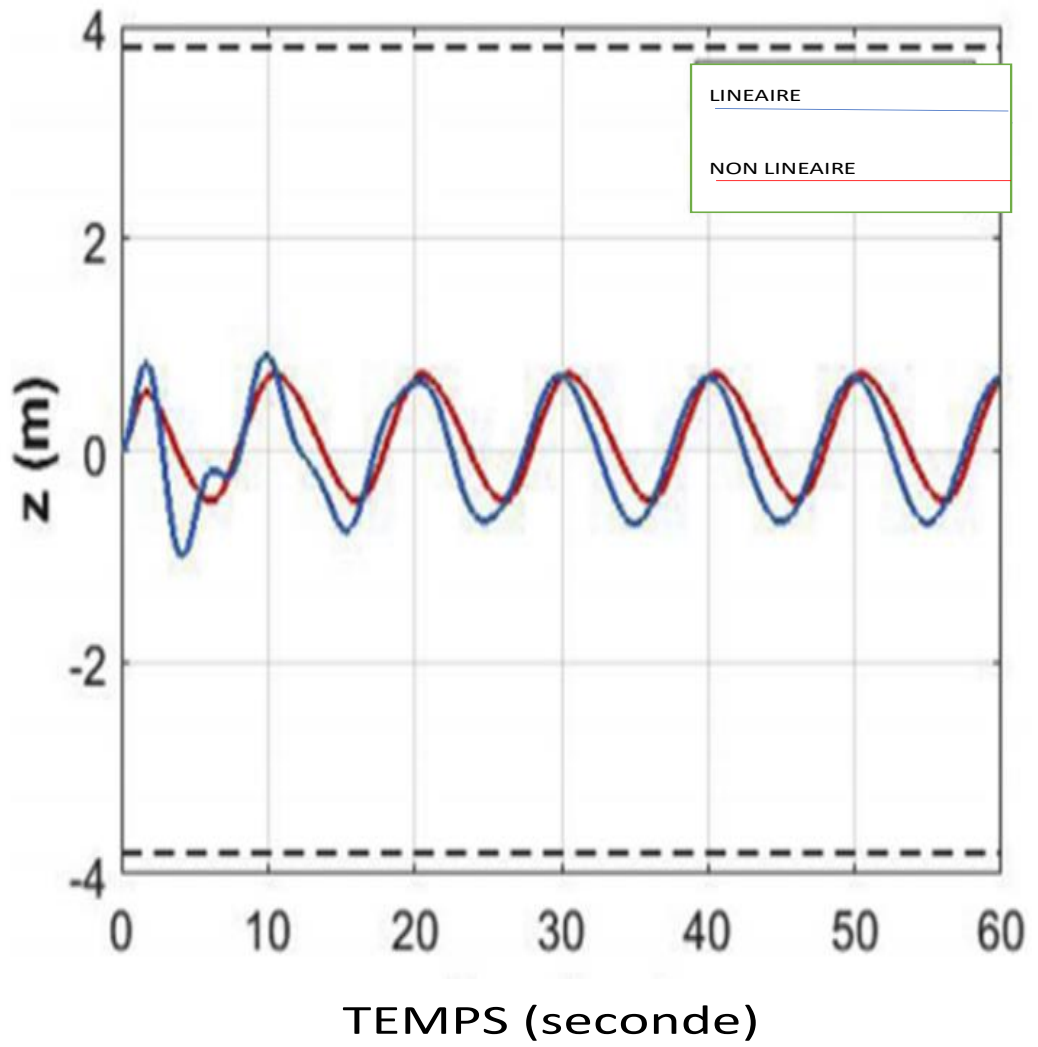


FIGURE 4 – déplacement des systèmes linéaires et non linéaires dans la même plage

Après une première période de transition, les déplacements des deux WEC ont à peu près les mêmes amplitudes et fréquences. On peut en dire autant sur les vitesses. Ce résultat met en évidence l'important avantage que l'on peut obtenir lors de la conception simultanée de la forme et du contrôle. Dans ce cas d'étude, le système non linéaire a environ la même amplitude de mouvement que le système linéaire. La raison est due à la force du système non linéaire. Cette dernière semble annuler l'effet de la force de contrôle non linéaire sur le mouvement de la bouée. Encore, dans le calcul de la puissance récoltée, seule la force de contrôle est multipliée par la vitesse de la bouée. La force du système n'annule pas la force non linéaire de contrôle dans le calcul de la puissance. Si l'amplitude de référence de la force d'excitation est augmentée à $1319900N$, la quantité d'énergie récoltée augmente à environ 2,7 fois celle du système linéaire; avec un besoin minimum de puissance réactive et d'une faible amplitude de mouvement.

IV Optimisation à l'aide d'algorithmes génétiques

Avant de passer au cas plus réaliste d'une bouée dans une vague irrégulière, dans la section 5, nous soulignons que les coefficients de forme et de contrôle peuvent être optimisés afin de maximiser l'énergie récoltée. Le problème de l'optimisation peut être formulé comme suit :

$$\text{maximiser : } E = \int_0^T P(t)dt \quad (16)$$

Sous réserve de l'équation 9 où E est l'énergie récupérée sur une période T qui peut s'exprimer comme :

$$E = \int_0^T P(t)dt = - \int_0^T u\dot{z}dt = - \int_0^T \dot{z} \left(B\dot{z} + \sum_{i=1}^{Nc} \alpha_{ci}z^i + \sum_{j=1}^{Mc} \beta_{cj}\dot{z}^j \right) dt \quad (17)$$

Les variables de conception de ce problème d'optimisation sont $N_s, M_s, N_c, M_c, \alpha_{si}, \beta_{sj}, \forall i = 1, \dots, N_s$ et $j = 1, \dots, M_s, \alpha_{ck}$ et $\beta_{ck}, k = 1, \dots, N_c$ et $l = 1, \dots, M_c$. Le nombre total de variables varie puisque N_s, M_s, N_c , et M_c sont non constants.

Les variables N_s, M_s, N_c et M_c sont généralement appelées variables d'architecture car elles déterminent le nombre global de variables à optimiser. Aussi ce type de problème est généralement appelé problème d'optimisation de l'espace de conception de taille variable (VSDS). Le nouvel algorithme génétique des gènes cachés (HGGA) [13] sera utilisé pour résoudre ce problème d'optimisation. Le HGGA adopté dans ce travail est un algorithme d'optimisation conçu pour gérer les problèmes d'optimisation de VSDS. La section 4.1 présente le HGGA et la section 4.2 détaille sa mise en œuvre afin d'optimiser le contrôle et la forme de l'étude de cas présentée dans la Section.3

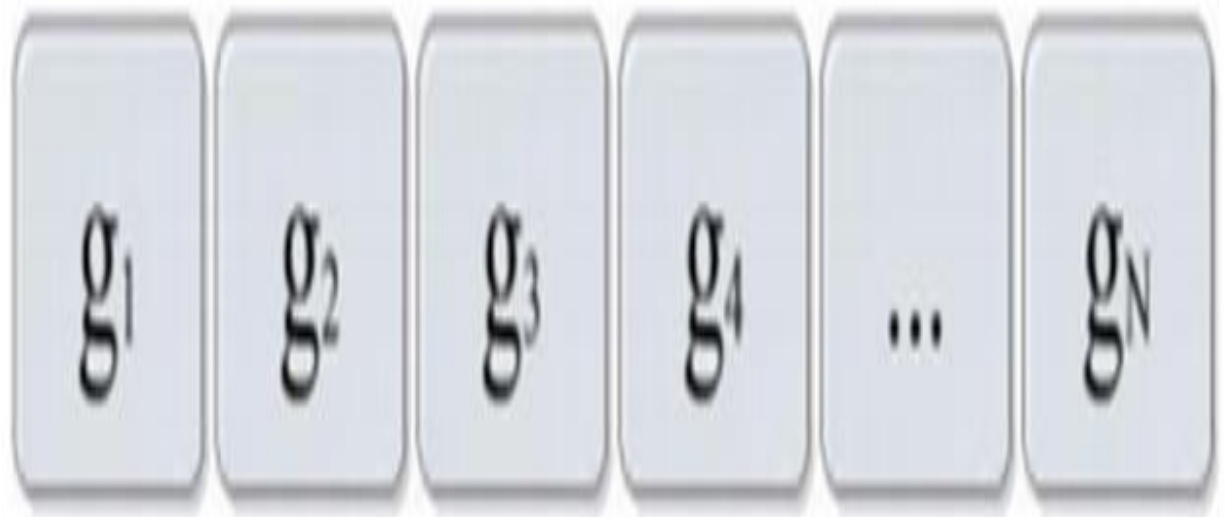


FIGURE 5 – les solutions sont représentées comme des chromosomes dans le GA

IV.1 Algorithme génétique des gènes cachés

Dans les algorithmes génétiques standards (AG), les variables du problème d'optimisation sont codées en chromosomes. Chaque chromosome présente une solution et comprend les variables codées sous forme de gènes. L'objectif de l'optimisation détermine l'adéquation de la solution. La figure 5 montre une solution à N variables sous forme de chromosomes à N gènes g_1, \dots, g_N . Les opérations génétiques de sélection, de mutation et de croisement sont appliquées sur une population de ces chromosomes, et à travers les générations (itérations). Ces populations convergent vers la solution optimale. Une simple (AG) commence par sélectionner deux parents parmi les générations (ou la population initiale générée aléatoirement). Ceci est appelé, le processus de relation. Il y a plusieurs critères pour choisir les deux parents. Celui qui est adopté ici est la sélection de l'opérateur de sélection de la roue où un membre est sélectionné avec une probabilité proportionnelle à sa forme physique. Ensuite, les opérations de mutation et de croisement sont appliquées sur les parents sélectionnés. Par exemple, dans le codage binaire, les gènes sont codés comme des 0 et 1 ; dans le processus de mutation, le gène 1 peut passer à 0 avec une probabilité de capacité de pm . Dans l'opération de croisement des parties du chromosome, les chaînes sont permutées dans les parents avec une probabilité de pc pour créer de nouveaux chromosomes. Certains des meilleurs chromosomes (élites) sont transférés à la prochaine génération sans changement. En répétant les opérations de l'(AG) pour chaque génération, la population converge vers la solution optimale. Le (HGGA) mis en œuvre dans cet article est une approche inspirée biologiquement qui cache différents gènes dans différents chromosomes pour créer les solutions pour différentes architectures, en utilisant la même méthode de codage (le chaîne de chromosomes) [13]. En fixant la longueur du chromosome à la longueur du chromosome le plus long possible L_{max} (en supposant le nombre maximal de variables de conception) et en désactivant certains gènes, différentes solutions de différentes architectures avec des longueurs variantes de 1 à L_{max} peuvent être construits. Les gènes qui sont cachés sont des variables qui n'affectent pas l'adéquation de la solution ; pourtant ils portent des informations. Ils passent par les opérations de l'(AG) et peuvent devenir actifs (non cachés) dans les générations futures.

A titre d'exemple, un opérateur de croisement à point unique dans (HGGA) est représenté dans la figure 6. Dans cet exemple, les gènes passent par l'opérateur de croisement, indépendamment des positions des gènes cachés, ce qui signifie que les gènes sont permutés à un point de croisement aléatoire (sur la Figure 6, il se situe entre le deuxième et les troisièmes gènes) avec probabilité pc comme un opérateur normal de croisement. Ensuite, certains gènes des chromosomes de l'enfant sont attribués parce que basé sur le mécanisme d'attribution de gènes caché [14]. La mise en œuvre du (HGGA) pour l'optimisation de la commande WEC est décrite dans les sections 4.2 et 4.3.

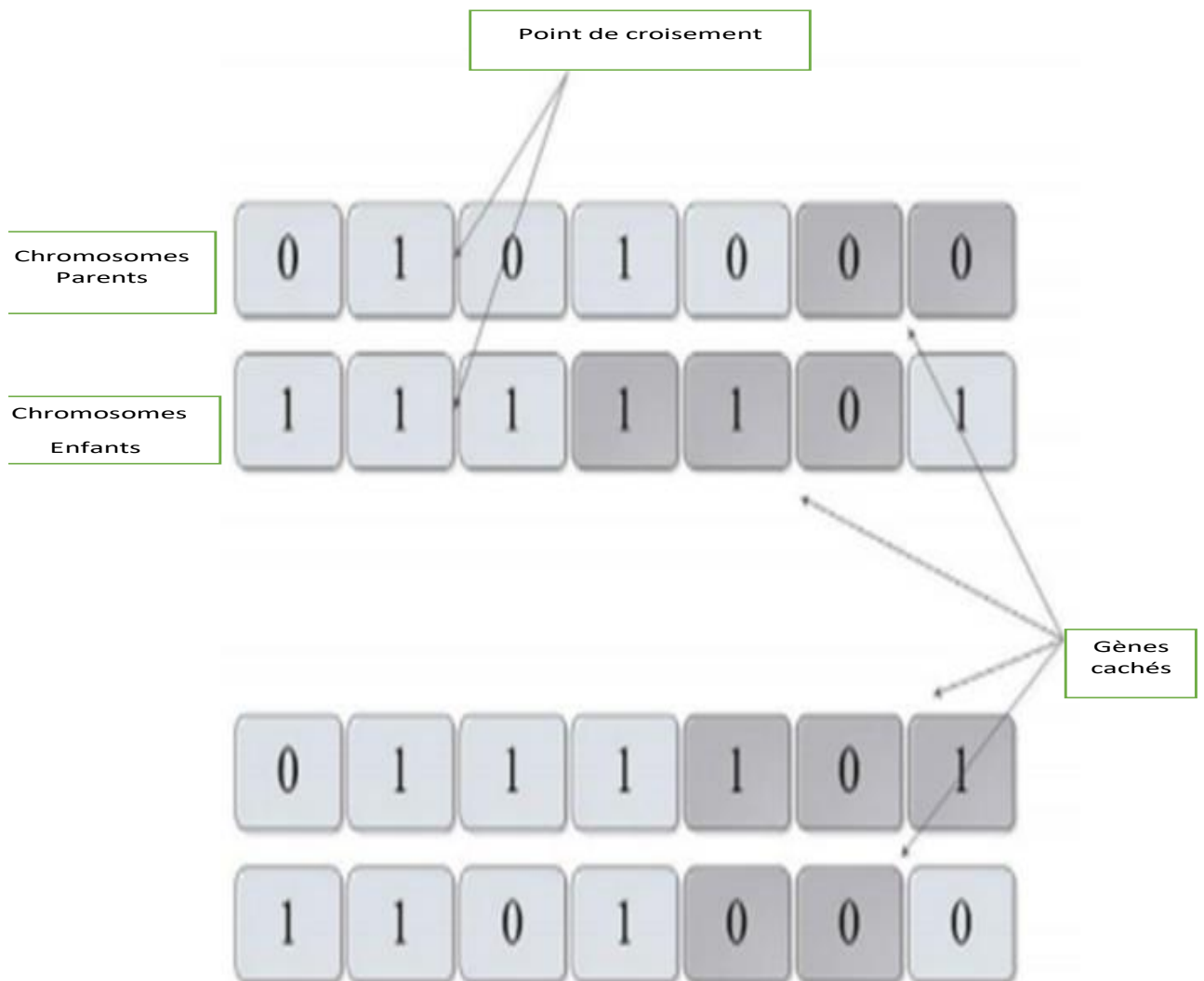


FIGURE 6 – un exemple de croisement dans HGGA

Tableau 1 – liaison sur les variables de conception

Variables de conception	valeurs
$\alpha_{c_{min}}$	$[0, -100 \times (m/(rT_w^2)), -100 \times (m/(r^2T_w^2)), -100 \times (m/(r^3T_w^2)), -100 \times (m/(r^4T_w^2)), -100 \times (m/(r^5T_w^2))]$
$\alpha_{s_{min}}$	$[0, -100 \times (m/(rT_w^2)), -100 \times (m/(r^2T_w^2)), -100 \times (m/(r^3T_w^2)), -100 \times (m/(r^4T_w^2)), -100 \times (m/(r^5T_w^2))]$
$\alpha_{c_{max}}$	$[0, 100 \times (m/(rT_w^2)), 100 \times (m/(r^2T_w^2)), 100 \times (m/(r^3T_w^2)), 100 \times (m/(r^4T_w^2)), 100 \times (m/(r^5T_w^2))]$
$\alpha_{s_{max}}$	$[0, 100 \times (m/(rT_w^2)), 100 \times (m/(r^2T_w^2)), 100 \times (m/(r^3T_w^2)), 100 \times (m/(r^4T_w^2)), 100 \times (m/(r^5T_w^2))]$
$\beta_{c_{min}}$	$[-20 \times (m/(rT_w)), -20 \times (m/r), -20 \times (mT_w)/r^2, -20 \times (mT_w^2)/r^3]$
$\beta_{s_{min}}$	$[-20 \times (m/(rT_w)), -20 \times (m/r), -20 \times (mT_w)/r^2, -20 \times (mT_w^2)/r^3]$
$\beta_{c_{max}}$	$[20 \times (m/(rT_w)), 20 \times (m/r), 20 \times (mT_w)/r^2, 20 \times (mT_w^2)/r^3]$
$\beta_{s_{max}}$	$[0, 0, 0, 0]$

IV.2 Cas d'une bouée dans une vague régulière

Il est nécessaire de trouver le nombre optimal de contrôles non linéaires et les coefficients du système, ainsi que leurs valeurs, pour que la fonction objective (énergie extraite) soit maximisée. Le cas d'étude présenté dans la section 3 est ici optimisé pour maximiser l'énergie récoltée. Une population de 20 membres et de 5 générations seulement est utilisée dans l'optimisation. Le nombre de membres élites est 2. Une limite de saturation est supposée sur la force de contrôle non linéaire \tilde{u}_c ; cette limite de saturation est égale à $1,1max(f_{ex})$. Également des solutions qui donnent une très grande amplitude de mouvement sont exclues. La valeur maximale possible pour N_s et N_c est 6, tandis que la valeur maximale possible pour chaque valeur de M_s et M_c est 4. Cela signifie que le chromosome est structuré tant qu'il possède 6 gènes pour α_s , 6 gènes pour α_c , 4 gènes pour β_s et 4 gènes pour β_c . Le nombre total de gènes est alors 20. Les limites inférieures et supérieures de ces variables de conception sont énumérées dans le tableau 1. Les données d'entrée pour l'optimiseur sont résumées dans le tableau 2.

Certaines des variables de conception sont cachées dans chaque chromosome. Différents chromosomes ont en général, différents gènes cachés; ce qui signifie que différentes solutions peuvent avoir différents termes non linéaires dans les forces du système et de contrôle. Les résultats de l'optimisation sont présentés dans le tableau 3 où la solution la mieux adaptée contient 3 gènes cachés dans N_c , 4 gènes cachés dans N_s , 4 gènes cachés dans M_s , et pas de gènes cachés dans M_c . La

valeur de chacun des variables représentées par les gènes cachés dans la solution optimale sont listées «0» dans le tableau 3. Les valeurs optimales des variables actives (non cachées) sont également répertoriées. Avec ces variables optimisées, l'énergie récupérée par le système non linéaire est de 1.591022106 *Joules*. Cela correspond à environ 4,9 fois l'énergie récupérée par le système linéaire simulé dans la section 3. La Figure 7 montre les performances de ce système optimisé dans lequel la puissance récoltée est nettement supérieure à celle du système linéaire tout en n'ayant besoin que d'une faible quantité de puissance réactive. Le mouvement du système non linéaire est dans le même ordre de grandeur que celui du linéaire, comme illustré à la Figure 8.

Tableau 2 – Case 1 : les données d'entrée dans l'optimiseur

Paramètre	valeurs
Nombre de membres de la population	20
Nombre de générations	5
Nombre de membres élites	2
Control Maximum $\tilde{u}_{c,max}$	$1.1 \times \max(f_{ex})$
Maximum N_s	6
Maximum N_c	6
Maximum M_s	4
Maximum M_c	4

Tableau 3 – liaisons de variables de conception

Variables de conception	valeurs
α_c	[0, 35559.9334, -12073.5531, 0, 0, 0]
α_s	[0, 37675.7192, 0, 0, 0, 0]
β_c	[297088.6252, 858572.1382, 735890.0019, 1386250.3445]
β_s	[10556.6641, 0, 0, 0]

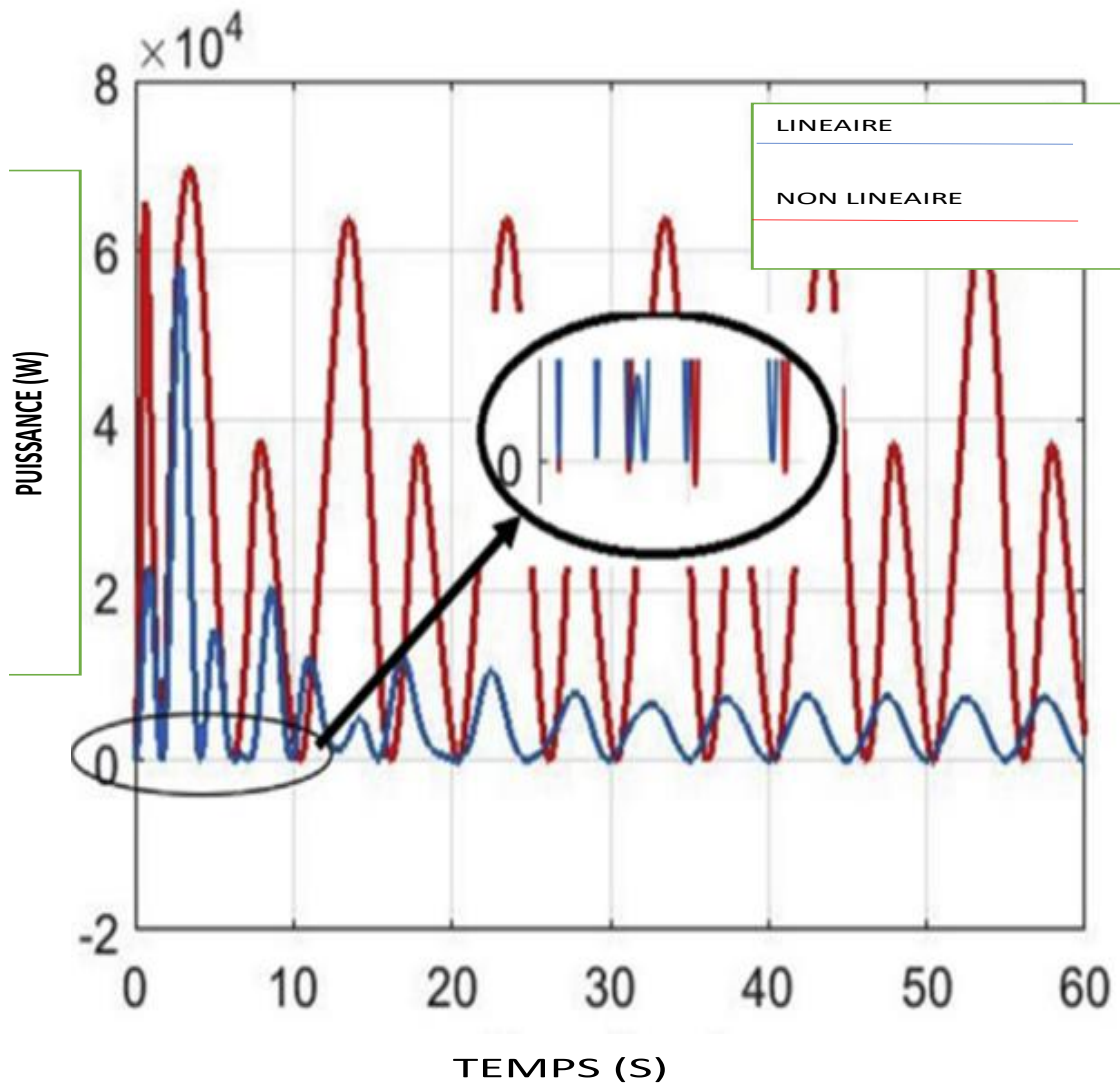


FIGURE 7 – puissance extraite pour l'optimisation dans le cas 1

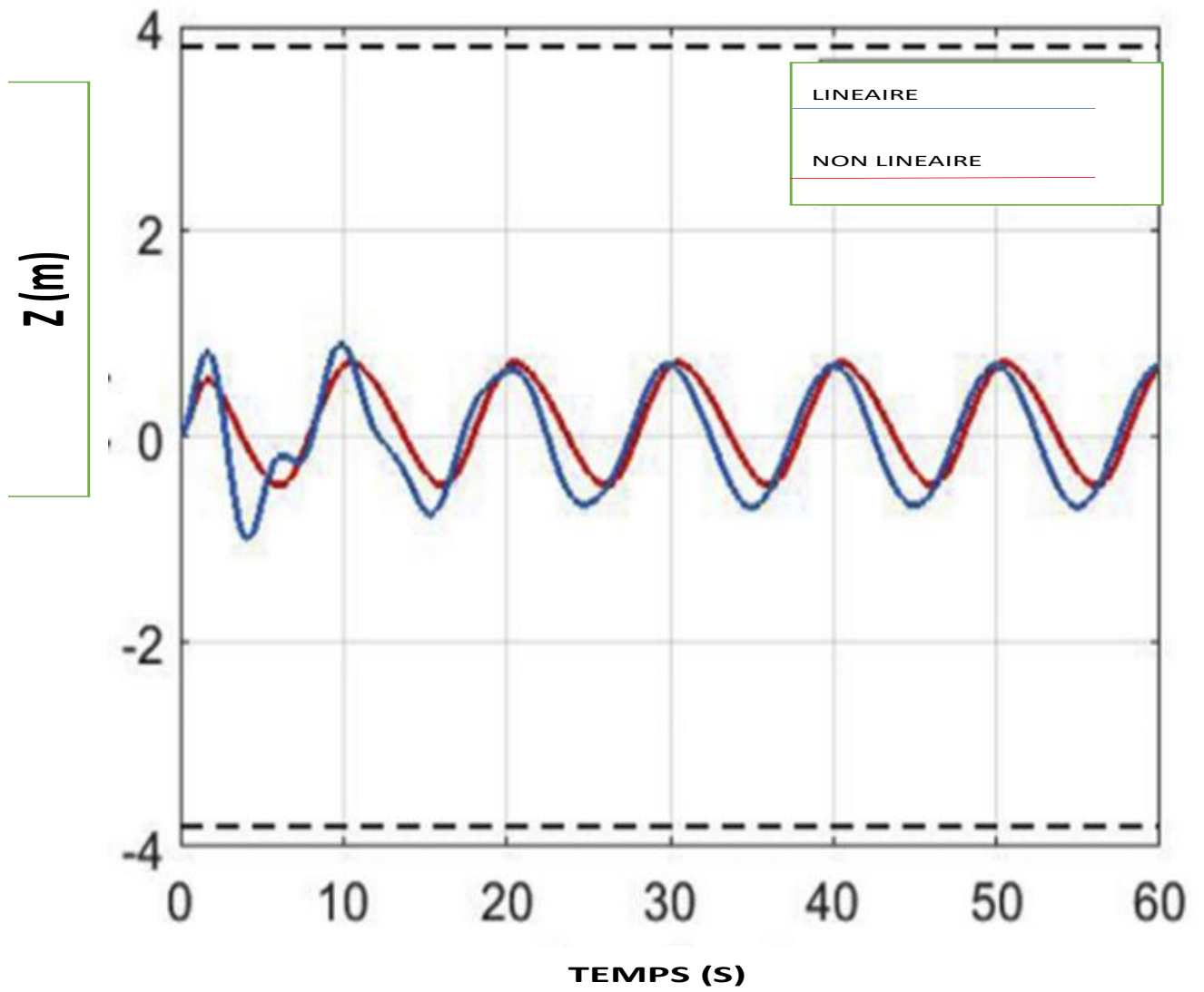


FIGURE 8 – la position de la bouée pour l'optimisation dans le cas 1

Tableau 4 – bouée conique : liaisons de variables de conception

Variables de conception	valeurs
$\alpha_{c_{min}}$	$-1000 \times [1, 1, 1, 1, 1, 1]$
$\alpha_{c_{max}}$	$1000 \times [1, 1, 1, 1, 1, 1]$
$\beta_{c_{min}}$	$-1000 \times [1, 1, 1, 1, 1, 1]$
$\beta_{c_{max}}$	$1000 \times [1, 1, 1, 1, 1, 1]$
$[\theta, r_w]_{min}$	$[10^\circ, 0.5\text{m}]$
$[\theta, r_w]_{max}$	$[30^\circ, 1\text{m}]$

IV.3 Cas d’une bouée conique

Cet article se concentre sur l’optimisation du contrôle non linéaire et les forces du système sans expliquer comment les forces optimisées du système peuvent être réalisées. Cet exemple cependant, est présenté pour montrer comment la forme de la bouée peut être optimisée avec le contrôle. Considérons une bouée de forme conique.

Giorgi et Ringwood [10] présentent une manière de calculer le coefficient de Froude Krylov, non linéaire statique et dynamique, et montrent que ces forces non linéaires de Froude-Krylov réduisent la quantité d’énergie récoltée par rapport au système linéaire. Ici, il est montré que lorsqu’un contrôle non linéaire est optimisé avec la forme, une augmentation significative de l’énergie récoltée peut être atteinte. Supposons que les forces non linéaires du système \tilde{f}_s ne sont que celles dues aux forces non linéaires de Froude-Krylov. Deux variables sont utilisées pour optimiser les dimensions du cône : l’angle du cône (θ) et le rayon de la bouée à niveau d’eau (r_w). Pour une présentation simple, supposons que $\tilde{f}_s(\theta, r_w)$ est une fonction de θ et r_w uniquement. Le HGGA présenté dans la section 4 est utilisé pour optimiser la force de commande \tilde{u}_c et les paramètres de forme de la bouée θ et r_w . Dans ce cas, le nombre de variables de contrôle est varié tandis que le nombre des variables de forme de bouée est fixe (2 variables). Le tableau 4 répertorie les plages sélectionnées pour les variables de conception où le nombre de variables de contrôle peut atteindre 12. On suppose une onde régulière ayant une amplitude de $0,3\text{m}$ et une période de 9s . Aucun amortissement visqueux n’est supposé. Au cours du processus d’optimisation, le (HGGA) essaie de nombreuses solutions de différentes sélections des variables de conception. Pour chaque ensemble de la conception de variable, le solveur d’éléments de frontière NEMOH est utilisé pour calculer les coefficients hydrodynamiques nécessaires pour calculer la diffraction linéaire et les forces de radiation. Ensuite, une simulation numérique de mouvement est effectuée en utilisant le modèle décrit dans l’équation (9). A chaque pas de temps dans la simulation numérique, la force statique non linéaire de Froude-Krylov $f_{Fk_{st}}(t)$ et les forces dynamiques non linéaires de Froude-Krylov $f_{Fk_{dyn}}(t)$ sont calculées pour cette bouée conique

en fonction des états du système et des variables de conception [10] ,

$$f_{Fk_{st}}(t) = f_g - 2\pi\rho gm \left[m\frac{\sigma^3}{3} + (q - mz)\frac{\sigma^2}{2} \right]_{\sigma_1}^{\sigma_2} \quad (18)$$

$$f_{Fk_{dyn}}(t) = \frac{2\pi}{\mathcal{X}}\rho gam^2 \cos(\omega t) \left[\left(\frac{q}{m} - \frac{1}{\mathcal{X}} - z + \sigma \right) e^{\mathcal{X}\sigma} \right]_{\sigma_1}^{\sigma_2} \quad (19)$$

avec, $\sigma = z - h_0$, σ_2 est l'élévation de la surface libre, h_0 est le tirant d'eau de la bouée sous l'eau en position de repos (eau calme), $\mathcal{X} = \frac{\omega^2}{g}$ est la longueur d'onde dans l'eau profonde, ω est la fréquence des vagues, g est l'accélération gravitationnelle, et $f_g = -mg$. La force de contrôle non linéaire est également évaluée à chaque pas de temps en fonction des états actuels et des variables de conception. Le processus HGGA évolue jusqu'à ce qu'une convergence soit atteinte. Les résultats de l'optimisation donne une forme de bouée de rayon $r_w = 0,578m$ et un angle de $\theta = 16.5^\circ$ (cela signifie que le tirant d'eau est de $1,95m$), et un contrôle non linéaire de la forme :

$$\tilde{u}_c = 669.5z + 456.4z^2 + 783.7z^3 - 999.9\dot{z} - 488.7\dot{z}^2 \quad (20)$$

Les résultats du contrôleur non-linéaire sont comparés à ceux de deux contrôleurs linéaires, celui du contrôleur d'amortissement linéaire et celui du contrôle conjugué proportionnel de la dérivée complexe (PDC3) [15]. Le contrôle (PDC3) est un contrôle de domaine temporel qui se rapproche du contrôle conjugué complexe ; le (PDC3) regroupe la rigidité et les termes d'amortissement et donc il peut fournir la puissance réactive, contrairement au contrôle d'amortissement linéaire. Le contrôle PDC3 est détaillé dans des références [15] ; il est conçu sur la base d'un modèle linéaire pour le WEC. Pourtant, ici il est testé dans un environnement non linéaire, en utilisant un propagateur non linéaire de la force Froude-Krylov pour souligner l'importance de disposer d'une force de contrôle non linéaire. Pour le contrôleur d'amortissement linéaire, le coefficient d'amortissement est choisi être égal à β_{c_i} dans le contrôleur non linéaire. Le (PDC3) a la rigidité et les termes d'amortissement sont tels que :

$$u_{PDC3} = -k_{up}z - k_{ud}\dot{z} \quad (21)$$

La bouée conique, avec la forme obtenue par optimisation, est simulée à l'aide d'un modèle non linéaire. La figure 9 montre les contrôleurs linéaires. Les résultats montrent que l'énergie récupérée est multipliée par 3,5 dans le cas du contrôleur non linéaire par rapport aux contrôleur linéaire. Ce résultat souligne l'importance de concevoir un contrôle non linéaire quand il y a des forces hydrodynamiques linéaires. Dans les WEC linéaires (hydrodynamique linéaire cylindrique), le PDC3 génère une énergie plus élevée par rapport au contrôle d'amortissement linéaire. En fait, Abdelkhalik et Al [16] présentent une étude des cas linéaire WEC dans

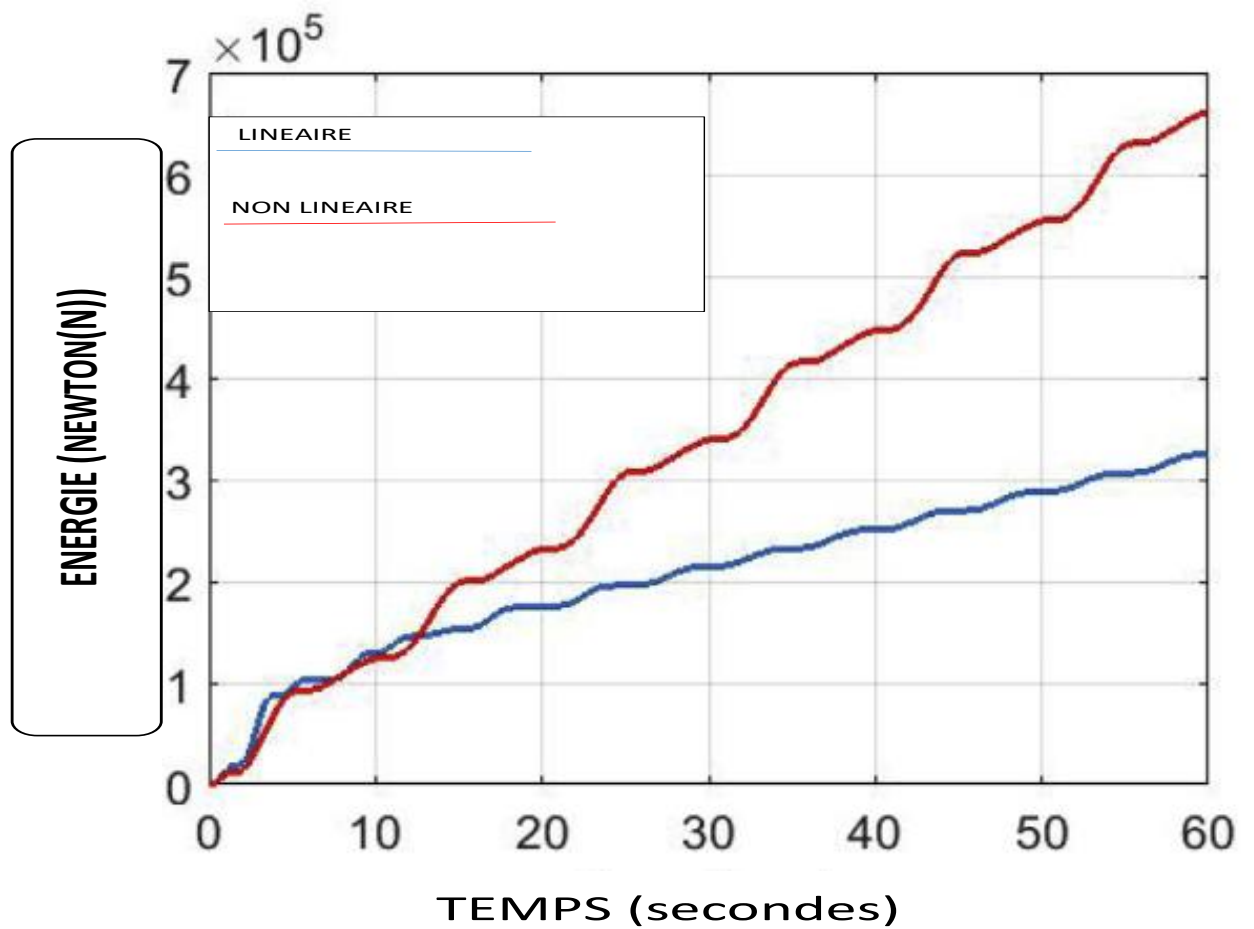


FIGURE 9 – l'énergie récupérée à l'aide d'un contrôleur non linéaire est supérieure à celle des contrôleurs linéaire pour la même forme de la bouée lors de l'optimisation du contrôle et de la forme dans le cas non linéaire

laquelle le conjugué complexe de contrôle génère environ 3,5 fois l'énergie récupérée avec un contrôle d'amortissement linéaire, qui est à peu près le même ratio que le contrôle non linéaire dans le cas d'un WEC non linéaire. A l'équilibre, la force de contrôle non linéaire a une valeur maximale d'environ $2500N$, le contrôleur linéaire d'amortissement $250N$ et le contrôleur PDC3 une valeur d'environ $1000N$. Le déplacement de la bouée dans le cas non linéaire a un maximum de $1,17m$ tandis que dans le cas linéaire il est de $0,65m$ pour le contrôleur d'amortissement et $2,25m$ pour le contrôleur PDC3.

La vitesse maximale de la bouée dans le cas non linéaire est de $1,6m/s$ alors que dans le cas linéaire, il est de $0,25m/s$ pour le contrôleur d'amortissement linéaire et $4,0m/s$ pour le contrôleur PDC3.

V Optimisation des WEC en ondes irrégulières

Le cas le plus réaliste est lorsque le WEC est dans une vague irrégulière. Dans cette section, nous supposons un spectre d'ondes de Bretschneider. La principale différence entre ce cas et le cas précédent d'ondes régulières est le calcul des forces de radiation et d'excitation. Ici, la force de radiation dépend de la fréquence et est représentée par la masse et l'amortissement ajoutés. La force d'excitation dépend également de la fréquence. L'équation du mouvement de la bouée est alors donnée par :

$$\bar{m}\ddot{z} = f_{ex} + u_l + \tilde{u}_c + \tilde{f}_s + f_r + f_B \quad (22)$$

où m est la masse en plus de la masse ajoutée à la fréquence infinie, f_B est la force de flottabilité linéaire, f_r est la force linéaire d'amortissement du rayonnement et f_{ex} est la force d'excitation linéaire. Toutes les forces du système non linéaire sont collectées dans le terme \tilde{f}_s .

Le contrôle non linéaire est \tilde{u}_c . La force linéaire de radiation f_r peut être calculée à l'aide d'un modèle d'espace d'état de la forme :

$$\dot{\mathcal{X}}_r = A_r \mathcal{X}_r + B_r \dot{z} \quad (23)$$

$$f_r = C_r \mathcal{X}_r \quad (24)$$

Où \mathcal{X} représente les états de radiation. Les matrices A , B et C sont calculées en fonction des masses ajoutées et des données d'amortissement ajoutées. Notez que quand $|z| > z_s$, et $z < 0$ alors $f_r = 0$ et $\bar{m} = m$. La force de flottabilité sur la bouée peut être calculée comme

$$f_B = \begin{cases} .mg - \rho g V_{bs} & \text{if } |z| < z_s \\ mg - \rho g V_b & \text{if } |z| > z_s, z > 0 \\ mg & \text{if } |z| > z_s, z < 0 \end{cases} \quad (25)$$

Où v_{bs} est le volume submergé, v_b est le volume total de la bouée.

La force d'excitation linéaire, f_{ex} , est :

$$f_{ex} = \sum_{n=1}^N a_n f_n \exp(-i(\omega_n t - \phi_n)) \quad (26)$$

où N est le nombre de fréquences utilisées pour réaliser l'onde, a_n les coefficients d'onde, f_n les coefficients de force d'excitation, ω_n des fréquences, et ϕ_n sont des déphasages. Considérons le même système que celui présenté à la section 3, mais cette fois, en supposant un spectre d'onde de Bretschneider avec une période de crête de 10s, et une amplitude de la vague de 0,7m. Soit la gamme de fréquences $\omega = [0.01 : 0.037 : 7]rad/sec$. Les déphasages initiaux sont sélectionnés de manière aléatoire dans la plage $[-\pi; \pi]$. Le système non linéaire et les coefficients de contrôle sont optimisés à l'aide de HGGA. Les limites supérieure et inférieure des variables de conception sont indiquées dans le tableau 5. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 6. Le total d'énergie récupérée en 60secondes de simulation est de 6.296549106Joules issu du système linéaire de base. L'énergie totale récoltée du système non linéaire correspond à 3.215181107joules, soit environ 5 fois la quantité récoltée de la bouée linéaire, comme illustré à la Figure 10.

Une puissance réactive significative est nécessaire dans ce cas indiqué à la Figure 11. Le mouvement du système non linéaire est considérablement plus élevé que celui du système linéaire, comme illustré à la Figure 12. La Figure 13 montre la vitesse de la bouée en fonction du temps et la Figure 14 montre la commande force sur la bouée, tant pour les cas linéaires que non linéaires. Notons que dans cette simulation, une limite de saturation est supposée sur la force de commande de 1,25106N.

VI Discussion

Cet article présente une méthode d'optimisation du contrôle non linéaire avec les non-linéarités du système pour maximiser la récolte d'énergie.

Nous supposons que ces forces du système non linéaire peuvent être générées pendant le processus de conception du système (comme la conception de la forme de la bouée) et / ou en modifiant la forme de la bouée en temps réel. Notons qu'il est possible d'extraire les coefficients de la force non linéaire du système \tilde{f}_s en utilisant CFD simulations. Un algorithme d'ajustement des moindres carrés non linéaire, par exemple, peut être utilisé pour adapter l'extension dans l'équation (2) aux forces non linéaires observées à partir des simulations CFD. Ce processus peut être utilisé de manière itérative pour concevoir une forme de bouée générant une valeur approximative de forces non linéaires prescrites. Ce processus, cependant, n'est pas abordé dans ce document. Considérons le cas où il n'est pas possible de trouver une forme de bouée qui générerait une force non linéaire prescrite (optimisée) \tilde{f}_s .

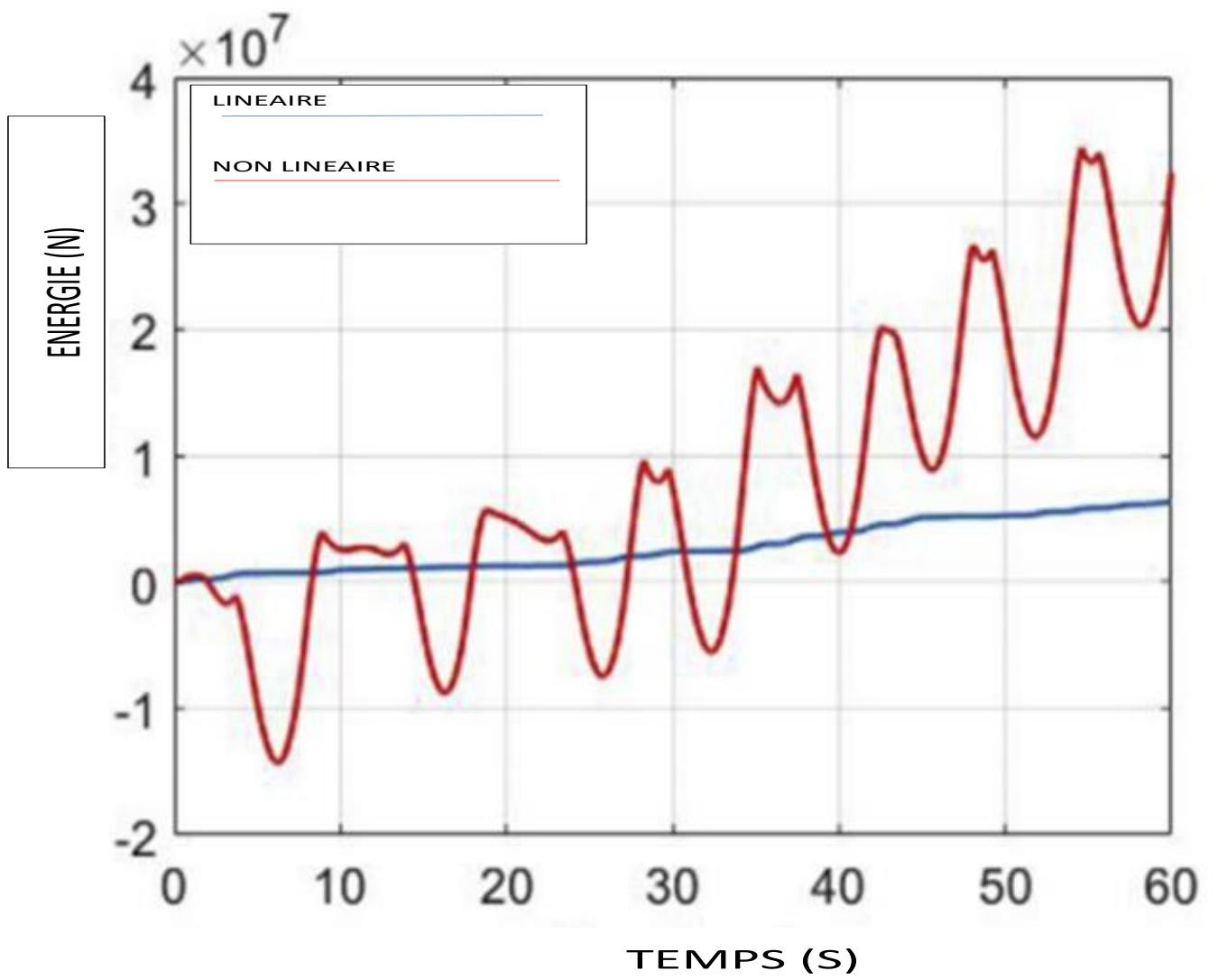


FIGURE 10 – Energie extraite d'une onde de Bretschneider

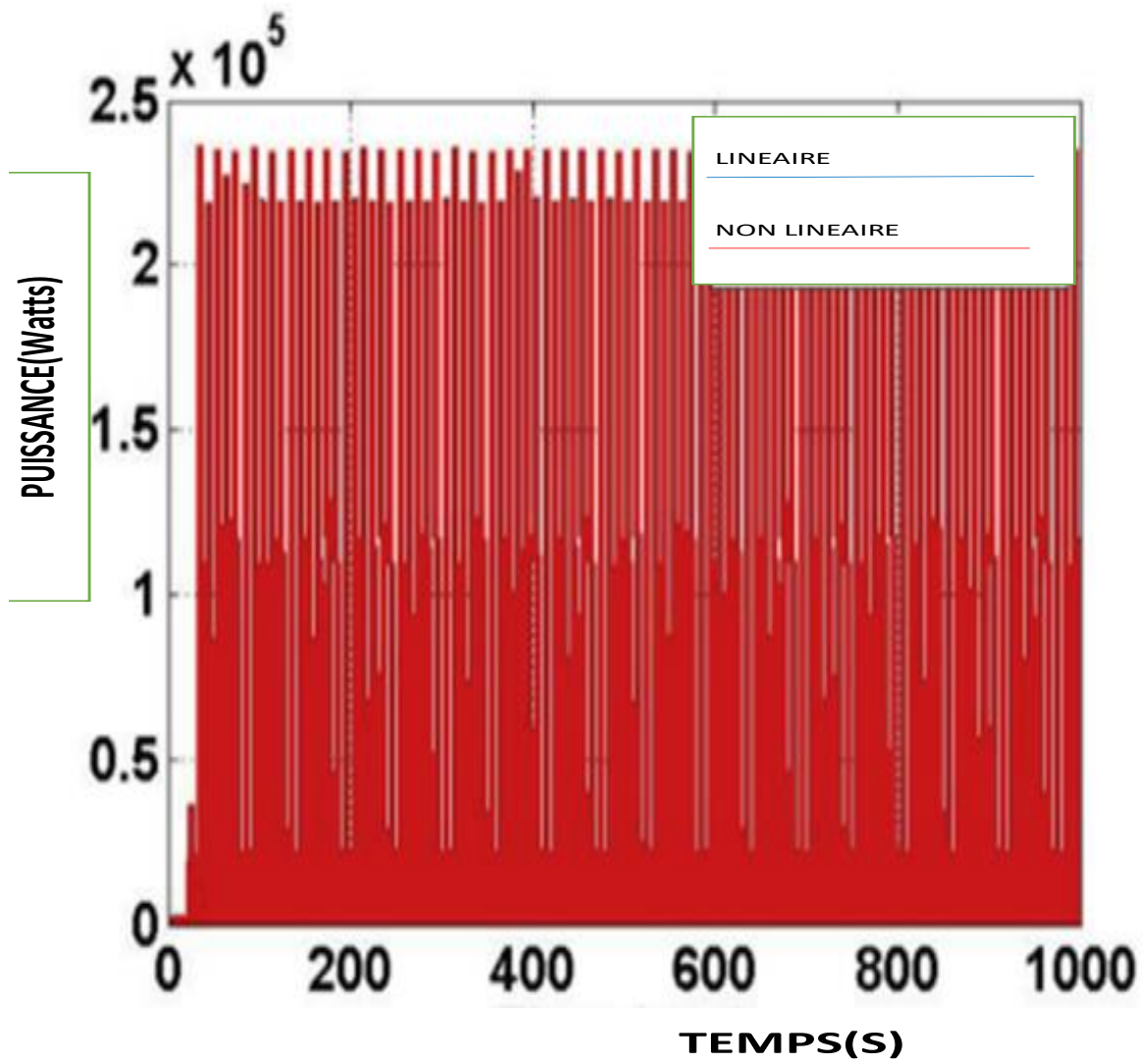


FIGURE 11 – puissance extraite d'une onde de Bretschneider

Tableau 5 – liaisons inférieures et supérieures des variables de conception

Variables de conception	valeurs
$\alpha_{c_{min}}$	$[0, -10^6, -10^6, -10^6, -10^6]$
$\alpha_{s_{min}}$	$[0, -10^6, -10^6, -10^6, -10^6]$
$\alpha_{c_{max}}$	$[0, 10^6, 10^6, 10^6, 10^6]$
$\alpha_{s_{max}}$	$[0, 10^6, 10^6, 10^6, 10^6]$
$\beta_{c_{min}}$	$[-2 \times 10^6, -2 \times 10^6, -2 \times 10^6, -2 \times 10^6]$
$\beta_{s_{min}}$	$[-2 \times 10^6, -2 \times 10^6, -2 \times 10^6, -2 \times 10^6]$
$\beta_{c_{max}}$	$[2 \times 10^6, 2 \times 10^6, 2 \times 10^6, 2 \times 10^6]$
$\beta_{s_{max}}$	$[0, 0, 0, 0]$

Tableau 6 – résultats d’optimisation pour le cas de la vague de Bretschneider

Variables de conception	valeurs
α_c	$[0, -508230.0876, 389006.9833]$
α_s	$[0, -190490.8616]$
β_c	$[1821835.7346, -1630799.6246]$
β_s	$[-849431.0745]$

Dans un tel cas, il est possible de modifier les termes de contrôle non linéaires pour compenser tout ou une partie de l’inaccessible force non linéaire \tilde{f}_s . Par exemple, considérons l’étude de cas présentée à la section 4.2 et supposons qu’il est impossible de concevoir une forme de bouée pouvant fournir la force optimisée \tilde{f}_s . Dans ce cas, il est possible de considérer par exemple que la forme de la bouée est cylindrique, et définir $\tilde{f}_s = 0$

Le HGGA est ensuite utilisé pour optimiser une force de commande non linéaire \tilde{u}_c comme indiqué dans l’équation (5). Ceci est réalisé et les résultats sont illustrés à la Figure 15. L’énergie récupérée dans ce cas est $4.29815610e5 \text{ joules}$, soit environ 1,32 fois l’énergie récupérée du système linéaire de la section 4.2. Comparez cette énergie au facteur d’amplification de 4,9 obtenu à la section 4.2 lorsque \tilde{f}_s et \tilde{u}_c ont été optimisés. Ce résultat corrobore l’affirmation selon laquelle une optimisation qui implique à la fois le contrôle et les systèmes de non linéarités pourraient conduire à une conversion énergétique plus efficace, par rapport à l’optimisation du contrôle uniquement pour un système donné. La section 2 présente le modèle dynamique adopté dans le cas des grands mouvements, ce qui entraîne des effets non linéaires. Il est possible d’éliminer ces effets en limitant le mouvement de la bouée, en utilisant des limitations de mouvement, ou le mécanisme d’arrêt. Cependant, l’un des objectifs de cette étude consiste à étudier la possibilité d’augmenter l’énergie investie lorsque ces non-linéarités sont exploitées, au lieu d’être évitées.

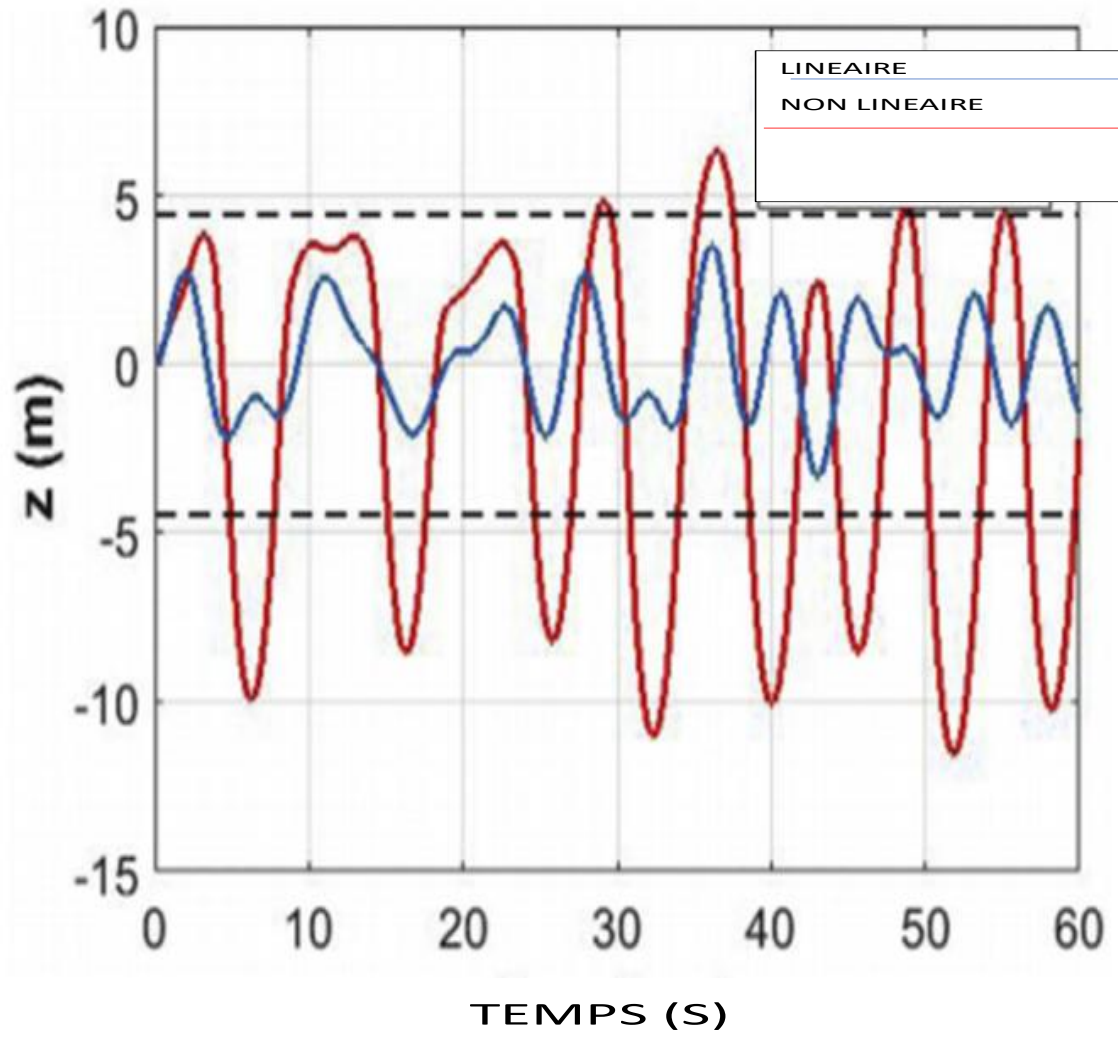


FIGURE 12 – position de la bouée dans une vague de Bretschneider

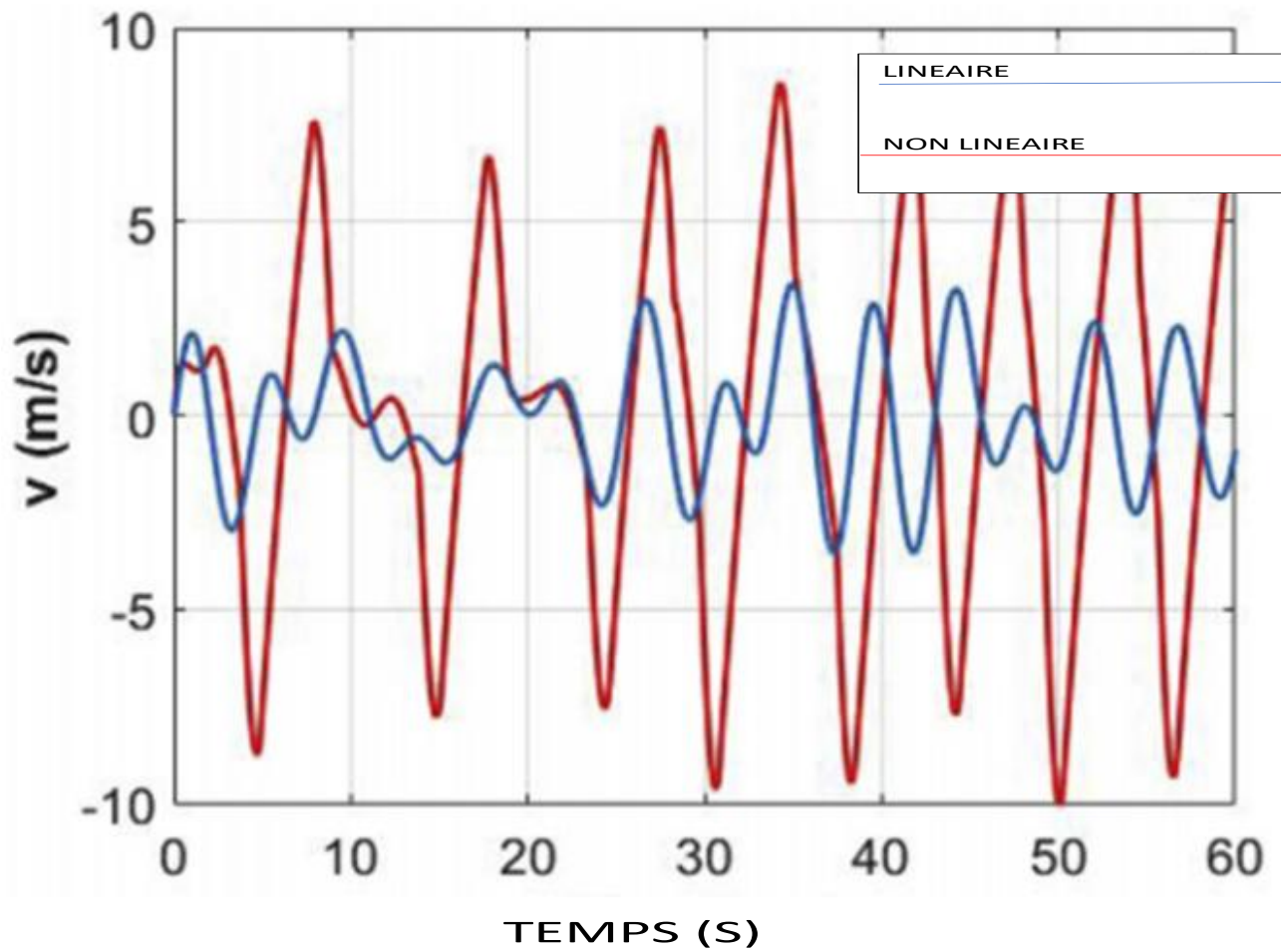


FIGURE 13 – vitesse de la bouée dans une vague de Bretschneider

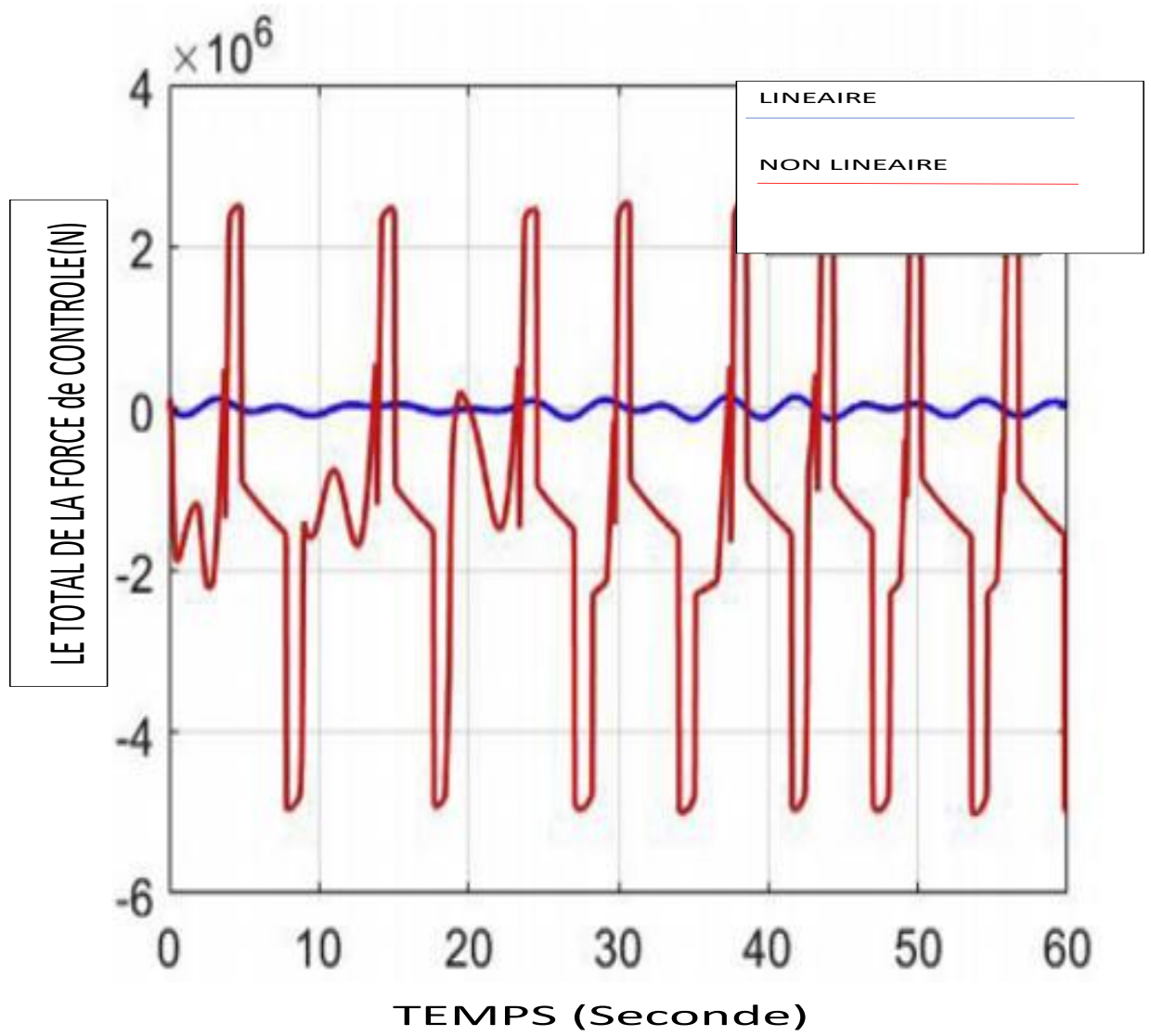


FIGURE 14 – la force de commande de la bouée dans la vague de Bretschneider

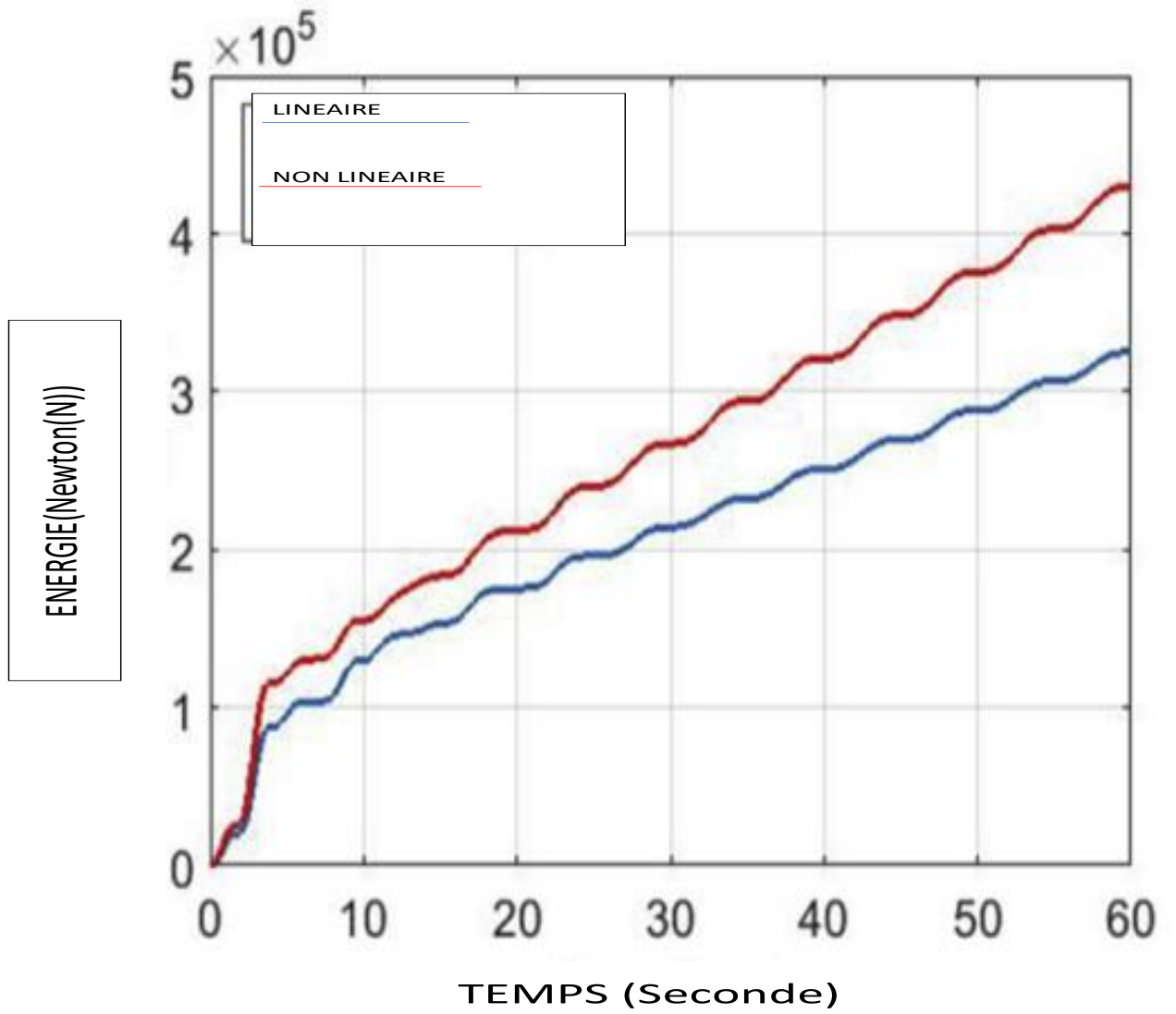


FIGURE 15 – Energie récoltée - pas de nonlinéarités du système

Par conséquent, l'approche générale dans ce document est de ne pas éviter les forces non linéaires ; mais plutôt essayer de modéliser ces non-linéarités et optimiser un contrôle en prenant en compte ces effets non linéaires. Il est également à noter que si le système a des forces non linéaires non optimisables, alors ces forces peuvent être ajoutées à l'équation du mouvement dans l'équation (1). Ce cas n'affecte pas la généralité de la méthode proposée dans ce papier, puisque l'optimiseur cherchera les paramètres optimaux dans les forces optimisables en présence des non optimisables. Enfin, le processus d'optimisation décrit dans cet article met en œuvre le HGGA qui pourrait ne pas convenir à la mise en œuvre en temps réel. Le HGGA est utilisé dans cet article à des fins de conception. Une fois que la forme la bouée est optimisée, les valeurs obtenues pour les coefficients α_s et β_s deviennent des constantes qui ne changent pas pendant le fonctionnement. En ce qui concerne la contrôle, les coefficients α_c et β_c peuvent être optimisés pour une plage d'états de la mer et stockés dans une table de consultation. En cours de fonctionnement, ce tableau de recherche peut être utilisé pour sélectionner ou interpoler les valeurs appropriées pour α_c et β_c . De plus, si un réglage supplémentaire est nécessaire pendant le fonctionnement, cette table de consultation peut être utilisée pour fournir une bonne estimation initiale pour un plus rapide algorithme d'optimisation.

VII Conclusion

Ce mémoire présente une approche d'optimisation pour le contrôle non linéaire des convertisseurs d'énergie houlomotrice. Cette méthode d'optimisation est également utilisée pour l'optimisation des non-linéarités dans le système, simultanément à l'optimisation du contrôle pour maximiser l'énergie récoltée et réduire le besoin de stockage d'énergie pour la puissance réactive. Les cas de test présentés dans cet article ont démontré la faisabilité de la conception d'un contrôle non linéaire qui récolte plusieurs fois plus d'énergie que celle obtenue avec un contrôle d'amortissement linéaire, en fonction de plusieurs facteurs, y compris les conditions de vagues. Il est également montré dans le présent document que les linéarités dans le système de conversion de l'énergie des vagues peuvent être optimisées avec le contrôle non linéaire, et l'énergie récoltée qui en résulte est également plusieurs fois plus élevée qu'un contrôle d'amortissement linéaire. Lors de l'optimisation des forces non linéaires du convertisseur d'énergie des vagues, à travers la conception en forme de bouée par exemple, il est montré que ces forces non linéaires dans le système «stockage d'énergie» fournissent tout ou une partie des ressources au besoin de puissance réactive.

VIII Perspectives

Il existe plusieurs systèmes de capture d'énergie des vagues. Par exemple, au niveau des barrages, nous avons le mécanisme de turbine (sous système des WEC) qui permet d'exploiter l'énergie des vagues. C'est le modèle qu'on trouve au niveau du barrage hydraulique de Manantali. En outre, ici au Sénégal, des études ont montré que les WEC peuvent être appliqués dans des barrages comme celui d'Affiniam avec la technique de l'osmose inverse (convertisseur + système de dessalement). Le dispositif comporte un flotteur (bouée), un élément de réaction et un cylindre hydraulique. Ainsi, connaissant tous les paramètres et toutes les données, on les applique à notre système. De ce fait, après simulation, on pourrait aboutir à une conversion d'énergie.

Références

- [1] FALNES, J. « A review of wave-energy extraction. » *Mar. Struct.* 20 (4), 185–201 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marstruc.2007.09.001>. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951833907000482>.
- [2] WOLGAMOT, H.A., FITZGERALD, C.J. « Nonlinear hydrodynamic and real fluid effects on wave energy converters, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. » Part. Accel. : *J. Power Energy* 229 (7), 772–794.2015. <http://dx.doi.org/10.1177/0957650915570351>.arXiv. <https://doi.org/10.1177/0957650915570351>.<https://doi.org/10.1177/0957650915570351>.
- [3] VILLEGAS ET VAN DER SCHAAF « Implementation of a pitch stability control for a wave energy converter » In : *Proc. 10th Euro. Wave and Tidal Energy Conf. Southampton, UK . 2011* ; ZOU ET AL., 2017.
- [4] GIORGI ET AL., 2016 « Nonlinear hydrodynamic models for heaving buoy wave energy converters.
- [5] BACELLI ET AL., 2015 « Nonlinear control of flap-type wave energy converter with a non-ideal power take-off system » *Annu. Rev. Contr.* 40, 116–126 <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2015.09.006><http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1367578815000437>
- [6] RETES ET AL., 2015*a*. « A review of non-linear approaches for wave energy converter modelling. » In : *11th European Wave and Tidal Energy Conference (EWTEC2015), Proceedings of the 11th European Wave and Tidal Energy Conference, Nantes, France.*
- [7] MERIGAUD ET AL ; RETES ET AL., 2015*b*. « Nonlinear FroudeKrylov force modelling for two heaving wave energy point absorbers. » In : *11th European Wave and Tidal Energy Conference (EWTEC2015), Proceedings of the 11th European Wave and Tidal Energy Conference, Nantes, France.*
- [8] GIORGI, 2017. « Linear and Nonlinear Parametric Hydrodynamic Models for Wave Energy Converters Identified from Recorded Data (PhD Dissertation). » Maynooth University.
- [9] PENALBA ET AL., 2017. « Mathematical modelling of wave energy converters : a review of nonlinear approaches. » *Renew. Sustain. Energy Rev.* 78, 1188–1207. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.137>.

- [10] GIORGI, G., RINGWOOD, J.V. « Computationally efficient nonlinear froude–krylov force calculations for heaving axisymmetric wave energy point absorbers. » *J. Ocean Eng. Mar. Energy* 1–13. 2016. <http://dx.doi.org/10.1007/s40722-016-0066-2>.
<https://doi.org/10.1007/s40722-016-0066-2>.
- [11] BABARIT ET AL., 2004 « Comparison of latching control strategies for a heaving wave energy device in random sea. *Appl.* » *Ocean Res.* 26, 227–238. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apor.2005.05.003>; DURAND ET AL.; CLÉMENT ET BABARIT, 1959. « Discrete control of resonant wave energy devices, philosophical transactions of the royal society of london a : mathematical. » *Phys. Sci.Eng.* 370 (2011), 288–314. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2011.0132>. arXiv. <http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/370/1959/288.full.pdf>.<http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/370/1959/288>.
- [12] NAYFEH, A., MOOK, D., « Nonlinear Oscillations. ; Nonlinear Power Flow Control Design. Springer. » Wiley Classics Library. Wiley. 2008. <https://books.google.com/books?id=sj3ebg7jRaoC>. ROBINETT III, R.D., WILSON, D.G., 2008.
- [13] ABDELKHALIK, O. « Hidden genes genetic optimization for variable-size design space problems. » *J. Optim. Theor. Appl.* 156 (2), 450–468. 2013. <http://dx.doi.org/10.1007/s10957-012-0122-6>.<https://doi.org/10.1007/s10957-012-0122-6>.
- [14] ABDELKHALIK, O., DARANI, S. « Hidden genes genetic algorithms for systems architecture optimization. In : Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation. » Conference 2016, GECCO '16, ACM, New York, NY, USA, pp. 629–636. 2016. <http://dx.doi.org/10.1145/2908812.2908819>.<http://doi.acm.org/10.1145/2908812.2908819>.
- [15] ABDELKHALIK ET AL.;2016; SONG ET AL. , 2016. « Multiresonant feedback control of heave wave energy converters. » *Ocean Eng.* 127, 269–278. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.09.046><http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801816304346>.
- [16] ABDELKHALIK ET AL, 2017. « Estimation of excitation forces for wave energy converters control using pressure measurements. » *Int. J. Contr.* 90 (8), 1793–1805. <http://dx.doi.org/10.1080/00207179.2016.1222555>. arXiv. <https://doi.org/10.1080/00207179.2016.1222555>.<https://doi.org/10.1080/00207179.2016.1222555>.