
Optimisation et aide à la décision multi-objectifs pour la conception robuste de structures métalliques sur fondations superficielles isolées

PIEGAY N.¹

¹ Université de Bordeaux, I2M, Département Génie Civil et Environnemental, Bât. B18, Avenue de facultés, 33405 Talence, nicolas.piegay@u-bordeaux.fr

RÉSUMÉ. Cet article détaille une approche d'évaluation et d'optimisation pour la conception d'une structure métallique reposant sur des fondations superficielles isolées. La recherche de la solution optimale est faite en considérant les préférences du décideur qui doit faire un choix respectant plusieurs objectifs contradictoires. Il s'agit de trouver le meilleur compromis entre les exigences de sécurité et les enjeux économiques. La variabilité des paramètres environnementaux (propriétés du sol, charge climatique...) et l'incertitude sur les valeurs seuils d'acceptabilité sont intégrés dans le processus de décision par une méthode de simulation basée sur le Latin Hypercube Sampling. Les réponses du système peuvent ainsi être caractérisées par une mesure de performance et par une mesure de dispersion permettant de juger de la robustesse de la solution vis-à-vis du caractère probabiliste des données d'entrée. Les effets de l'interaction existant entre le sol et la structure sont également considérés dans le souci d'aboutir à une optimisation globale de l'ouvrage.

ABSTRACT. This paper aims to present an evaluation and optimization approach for the design of a steel frame resting on spread foundations. Optimal structure is selected according to the decision-maker's preferences and considering various contradictory objectives. Thus, there is a need to find the best compromise between safety requirements and economic stakes. Variability of environmental parameters (soil properties, climatic load...) and uncertain acceptance threshold are incorporated in the decision process using Latin Hypercube Sampling method. Robustness of the structure in face of data variability is assessed by both a performance measure and a dispersion measure. Soil-structure interaction is also considered in this work in order to achieve a global optimization of the structure.

MOTS-CLÉS : Incertitudes, Optimisation, Aide à la décision, Structure métallique, Fondation, Interaction sol-structure .

KEY WORDS : Uncertainty, Optimization, Decision aid, Steel frame, Foundation, Soil-structure interaction.

1. Introduction

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'un projet d'installation industrielle de grande ampleur, pour lequel plusieurs centaines de structures légères et de fondations doivent être construites. L'industriel peut-être amené à installer de tels ouvrages dans des pays aux environnements très différents et mal connus a priori. Dans ce contexte, l'objectif de ce travail est triple pour assister l'industriel dans la conception de ces installations: (a) développer une méthodologie d'évaluation, d'optimisation et d'aide à la décision pour le choix d'une configuration de conception optimale en accord avec les préférences du décideur; (b) tenir compte des incertitudes de projet et de la variabilité des paramètres environnementaux dans la prise de décision; (c) identifier les variables qui contrôlent la prise de décision. Ce dernier point ne sera pas abordé dans cet article mais est essentiel pour identifier les paramètres (de modèles, environnementaux) qui jouent un rôle prépondérant dans le choix de la solution optimale et sur le comportement mécanique de l'ouvrage.

La conception fiable des fondations a fait l'objet de nombreuses études [JUAN 12, WAN 11] avec parfois l'introduction d'exigences économiques [BEL 09, WAN 08]. Ce critère économique apporte une dimension multi-objectifs au problème de conception qui prend toute son importance lorsque de nombreuses structures sont à construire. Il s'agit alors de trouver le meilleur compromis entre les exigences de sécurité de l'ouvrage et l'enjeu économique. Dans ce travail, le risque est vu comme l'incapacité à satisfaire les exigences de performance considérant différents niveaux d'incertitudes (contexte socio-économique, seuils d'acceptabilité sur les critères) et de variabilités (propriétés du sol, charge climatique).

Cet article détaille dans un premier temps la méthodologie adoptée pour conduire à une prise de décision robuste en considérant l'ouvrage dans son ensemble (Infrastructure + Superstructure). Nous montrerons ensuite qu'une optimisation locale sans prise en compte des interactions entre le sol et la structure ne conduit pas nécessairement à l'optimum global du système.

2. Formulation du problème de conception

On distingue deux catégories de paramètres permettant de définir une configuration de conception: les paramètres de décision et les paramètres environnementaux.

Les paramètres de décision regroupent les variables de conception et les variables de projet. Les variables de conception sont les variables que l'on cherche à optimiser pour avoir le meilleur compromis entre les objectifs. L'affectation de valeurs à toutes les variables de conception constitue une configuration particulière du système appelée *alternative*. Les variables de projet sont imposées dans le cahier des charges et sont relatives à la définition du projet (architecture générale de l'ouvrage...) et à la stratégie de l'entreprise (nombre d'ouvriers mobilisés, temps de travail journalier dans les limites de la législation en vigueur...). La frontière entre les variables de conception et les variables de projet peut-être déplacée en fonction de la capacité du concepteur à peser sur les choix du projet.

Comme les variables de projet, les paramètres environnementaux sont identiques pour l'ensemble des alternatives à évaluer et correspondent à l'environnement naturel du site et au contexte socio-économique. Ces paramètres sont variables ou incertains et représentés par des distributions de probabilité. L'environnement naturel est décrit par le chargement climatique appliqué à la superstructure ainsi que par les propriétés du sol sur lequel repose les fondations. L'environnement socio-économique est relatif aux coûts unitaires de la main d'œuvre, des matériaux et du matériel ainsi qu'à la qualification des ouvriers (rendements attendus).

2.1. Les variables et contraintes de conception

2.1.1. Structure à ossature métallique

On considère une structure à ossature métallique, illustrée à la figure 1, d'une largeur de 18m et d'une hauteur de 1,5m chargée uniformément et verticalement par une charge permanente $p = 2500$ N/ml. Ces valeurs sont fixées par le cahier des charges (variables de projet) et nous n'avons aucun pouvoir d'agir sur celles-ci. Les charges climatiques sont vues comme variables et représentées par des distributions log-normales avec un coefficient de variation de 15% [ORR 08]. Les charges climatiques verticales ($Q_v=7500$ N/ml) sont supposées parfaitement corrélées aux charges climatiques horizontales ($Q_h=5000$ N/ml).

Quatre types de variables de conception sont considérés: le nombre de poteaux, les caractéristiques des éléments structuraux (poteaux et poutres), le type d'assemblage pour les liaisons poutre-poteau, et la disposition ou non d'éléments de contreventement.

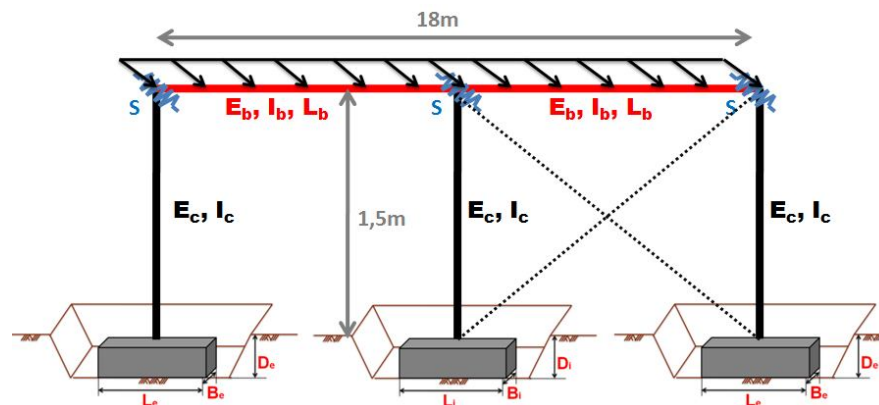


Figure 1. Schéma du système étudié

Les éléments porteurs sont sélectionnés à partir du catalogue de profilés métalliques disponibles. Les éléments structuraux sont choisis parmi un ensemble de 15 IPE (IPE80→IPE450) pour les poutres et parmi un ensemble de 15 HEB (HEB100→HEB400) pour les poteaux. Le nombre de poteaux peut varier de 3 à 6 et le système de contreventement est modélisé par deux câbles disposés en diagonale (travaillant en traction) et situé au plus proche du milieu de l'ouvrage. Conformément à l'Eurocode 3 [EC3 05], les assemblages poutre-poteau peuvent-être classés comme rigides, semi-rigides ou de type articulé. La rigidité des assemblages étant difficile à déterminer, nous considérons dans un premier temps les valeurs limites de rigidité en rotation S fixées par l'Eurocode 3 et déterminées à partir du moment d'inertie de flexion de la poutre et de sa portée. Une analyse de sensibilité non présentée ici montre que l'on atteint un comportement articulé pour $S=1.10^2$ N.m/rad et un comportement encastré pour $S=1.10^7$ N.m/rad.

2.1.2. Fondations superficielles isolées

Les variables de conception des fondations sont leur profondeur D , leur largeur B , et leur longueur L . Elles doivent respecter certaines contraintes pratiques tels que $0,3 \text{ m} \leq L \leq 3 \text{ m}$, $0,5 \text{ m} \leq D \leq 2 \text{ m}$ et $1 \leq L/B \leq 5$ qui définissent l'espace de conception. Nous distinguons les fondations supportant les poteaux extérieurs et les fondations supportant les poteaux intérieurs. De plus, pour des questions évidentes de mise en œuvre, seules des valeurs discrètes arrondie au centimètre sont considérées.

La structure métallique est modélisée par des éléments finis de type poutre avec des éléments ressorts sous chaque appui pour gérer l'interaction sol-structure. Des expressions analytiques adaptées de Gazetas [MYL 05] sont utilisées pour attribuer des valeurs de rigidité verticale, horizontale et de rotation aux appuis élastiques de la structure. Ces expressions font intervenir les caractéristiques élastiques du sol ainsi que les variables de conception de la fondation. En raison des limitations sévères sur la déformation de la structure et du manque d'information sur la rigidité en rotation des assemblages pseudo-articulés, les pieds de poteaux sont supposés dans un premier temps parfaitement encastres dans la fondation.

2.2. Variabilité des propriétés du sol

Les propriétés géotechniques sont modélisées par des variables pseudo-aléatoires suivant chacune une loi de probabilité de moyenne et de variance fixée. Pour générer ces variables, nous utilisons la technique du Latin Hypercube Sampling qui, par rapport à la méthode Monte-Carlo classique, permet de réduire considérablement le nombre de simulations pour atteindre un niveau de confiance acceptable sur les résultats.

Nous utilisons des lois log-normales pour modéliser la variabilité intrinsèque du sol. Ce type de distribution est bien adapté aux paramètres strictement positifs. Pour attribuer des paramètres statistiques à chaque caractéristique de sol, on se réfère à quelques-unes des nombreuses études fiabilistes des ouvrages en géotechnique [BRE 11, CHE 00, PHO 99, ORR 08]. Une attention particulière est également portée à la corrélation existant entre la cohésion effective et l'angle de frottement interne. Si cette corrélation est généralement admise comme étant négative, sa valeur est incertaine et sujet à discussion notamment à cause de ses effets mal connus sur la fiabilité des fondations. Dans un premier temps une valeur égale à $-0,6$ est considérée [CHE 00] pour le coefficient de corrélation.

Même en considérant un sol relativement homogène, il peut exister des variations non-négligeables d'un point à l'autre, pouvant notamment provoquer des tassements différentiels à l'échelle de l'ouvrage. La structure de corrélation spatiale pour chaque propriété (angle de frottement, cohésion, module d'Young) est décrite par une longueur de corrélation et par une fonction d'autocorrélation [BRE 11]. On ne considère ici que la longueur de corrélation horizontale pour créer le champs aléatoire, le niveau d'assise des différentes fondations étant considéré identique. Le tableau 1 résume l'ensemble des hypothèses faites pour caractériser la variabilité du sol.

Tableau 1. Hypothèses pour la caractérisation de la variabilité du sol

Propriétés du sol	Distribution	Moyenne	COV (%)	Longueur de corrélation (m)	Fonction d'autocorrélation
Cohésion effective	Log-normale	14 kPa	25	10m	Exponentielle
Angle de frottement	Log-normale	26°	10	10m	Exponentielle
Poids volumique	Log-normale	18 kN/m ³	5	/	/
Module d'Young	Log-normale	40 MPa	30	10m	Exponentielle
Coefficient de Poisson	Uniforme	0.4	7	/	/

3. Evaluation des objectifs

On définit quatre familles d'objectifs respectivement relatifs aux états limites ultimes (ELU), aux états limites de service (ELS), au coût de réalisation et au temps d'exécution de l'ouvrage. Chaque objectif est d'abord estimé en termes de performance (par le modèle de dimensionnement), puis interprété en termes de satisfaction (par une fonction de désirabilité) et enfin, évalué en termes de robustesse (par une fonction objectif robuste).

3.1. Modèle de dimensionnement

Les paramètres identifiés au §2. sont les données d'entrée d'un modèle de dimensionnement traduisant les fonctions du système et les comportements mis en jeu. Ce modèle est construit à partir des règles métier et de la

règlementation. Les sorties du modèle qualifiées d'indicateurs de performance (notées *IP*) contribuent à l'évaluation des alternatives. L'ensemble des *IP* considérées sont présentées dans le tableau 2.

Les modes de défaillance de la structure métallique et des fondations sont définis conformément aux préconisations de l'Eurocode 3 [EC3 05] et de l'Eurocode 7 [EC7 05]. Les efforts dans les éléments métalliques, les déformées et les réactions aux appuis sont obtenus par des calculs par éléments finis implémentés sous Matlab, dont les résultats sont confrontés aux exigences des ELU et des ELS de la structure et des fondations. Les instabilités structurales de flambement et de déversement ne sont pas considérées ici mais pourront être introduites sous la forme de contraintes de conception lorsque l'élanement relatif des éléments structuraux est susceptible d'affecter leur résistance.

Tableau 2. Présentation des Indicateurs de Performance (pondération)

Eléments de l'ouvrage	Indicateurs ELU	Indicateurs ELS	Indicateurs non-techniques
Ossature métallique	Flexion composée des éléments structuraux (0,06)	Déplacement vertical maximal de la structure (0,15)	
	Résistance à l'effort tranchant des éléments structuraux (0,06)	Déplacement horizontal maximal de la structure (0,15)	
Fondations	Capacité portante (0,06)		
	Résistance au glissement (0,06)		
	Excentricité de la charge (0,06)		
Global			Coût (0,35) Délais (0,05)

Les ELU sont évalués sous la forme de facteurs de sécurité (*FS*) qui sont généralement comparés à des facteurs partiels de sécurité (γ) tel que $FS \geq \gamma$. Pour relativiser la notion stricte de seuil acceptable et tenir compte plus fidèlement des exigences des décideurs, des fonctions de désirabilité sont utilisées (cf §3.2). Les états limites peuvent aussi être caractérisés par des probabilités de défaillance (ou par des indices de fiabilité) obtenues par des méthodes de simulation (Monte Carlo) ou par des méthodes fiabilistes (FORM). Cette approche de conception fiabiliste (*Reliability-based design*) n'est pas abordée dans cet article.

Les *IP* non-techniques de coûts *C* et de délais *D* sont obtenus à partir d'une décomposition des tâches de travail [WAN 08] auxquelles on associe des quantités *Q*, des prix unitaires *P* et des temps unitaires *T* telles que:

$$C = \sum_{j=1}^t Q_j \cdot P_j \quad \text{et} \quad D = \sum_{j=1}^t (Q_j \cdot T_j) / N_W \quad [1]$$

où N_W est le nombre d'équipes de travail mobilisées parallèlement.

Pour les fondations coulées en place, on identifie cinq tâches principales avec la réalisation de l'excavation, du coffrage, des armatures, du béton et des remblais compactés. Pour la structure métallique, on distingue le montage des poutres (incluant les assemblages poutre-poteau par cornières, par assemblages boulonnés raidis ou non), des poteaux (incluant les assemblages encastrés en pieds de poteau) et des éventuels éléments de contreventement. Les prix unitaires et les rendements peuvent être variables selon le lieu d'installation, la qualification de la main d'œuvre ou le contexte socio-économique. Ces paramètres sont modélisés par des distributions triangulaires dont le support varie de +/- 10% autour de la moyenne.

On obtient finalement neuf types d'*IP*, chaque variable étant caractérisée par sa distribution statistique qui résulte du caractère stochastique de certaines données d'entrée.

3.2. Fonctions de désirabilité

Pour chaque objectif de conception, on introduit une fonction de désirabilité. Celle-ci a deux intérêts : (a) elle enrichit la notion de « seuil acceptable » de manière à traduire son caractère non déterministe dû à l'imprécision des préférences du décideur, (b) elle permet de prendre en compte une plus ou moins forte aversion aux risques attachée à chaque objectif.

La fonction de désirabilité prend des valeurs comprises entre 0 et 1 et traduit le degré de satisfaction du décideur sur les valeurs prises par un *IP*. Une valeur de 0 traduit un non-respect total de l'objectif alors que 1 exprime une pleine satisfaction. Lorsque les unités de mesure et les intervalles de valeurs des *IP* sont différentes, l'utilisation de fonctions de désirabilité présente en outre l'intérêt de normaliser l'ensemble des performances sur une échelle unique de désirabilité sans dimension.

Les fonctions de désirabilité One-sided de Derringer [DER 80], représentées en figure 2, sont utilisées. Selon qu'elles sont croissantes ou décroissantes, ces fonctions permettent de décrire aussi bien les objectifs sur des variables à maximiser (coefficients de sécurité) que sur celles à minimiser (coûts, délais, déplacements). Pour une fonction croissante, Y_{min} est la valeur minimale acceptable pouvant être prise par l'IP Y_i et Y_{max} est la valeur au-dessus de laquelle la désirabilité d_i atteint 1. Notons que lorsque $Y_{min}=Y_{max}$, l'objectif concerné est alors identifié comme une contrainte ($d_i=0$ ou $d_i=1$).

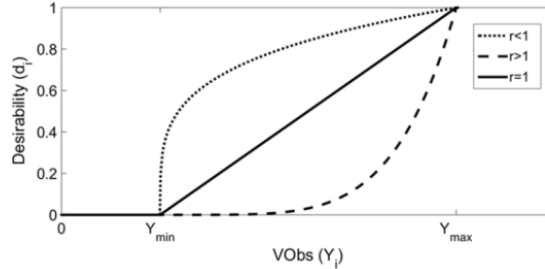


Figure 2. Courbe de désirabilité One-sided croissante

Ces expressions font intervenir le paramètre r qui permet d'ajuster la courbure pour formaliser finement les satisfactions du décideur. Pour une même valeur d'IP, plus la valeur de r est grande ($r > 1$), plus la désirabilité d_i correspondante tend vers 0 et donc plus le décideur est aversé au risque. Pour $r = 1$, l'utilisateur est neutre face au risque. En pratique, une série d'entretiens a été conduite avec les experts intervenant dans le projet afin d'identifier leurs préférences vis-à-vis de chaque objectif et de construire conjointement les courbes de désirabilité.

Pour chaque valeur pouvant être prise par un IP, on calcule la désirabilité sur l'objectif concerné. Quand l'entrée est une distribution statistique d'IP, la sortie est une distribution de désirabilités.

3.3. Fonction objectif robuste

Dans l'optique de choisir une solution optimale robuste, nous introduisons des fonctions objectif qui combinent pour chaque IP la moyenne des désirabilités (appelée mesure de performance) et la variance des désirabilités (appelée mesure de dispersion). Cette mesure de robustesse agit indirectement comme un objectif supplémentaire à maximiser. La fonction objectif robuste f_i de l'alternative X_n , définie par le vecteur \vec{x}_n des variables de conception, peut s'écrire [APL 06]:

$$f_i(\vec{x}_n) = E[F_{X_n,i}] - \beta \cdot \sqrt{\text{Var}[F_{X_n,i}]} \quad \text{avec } \beta \geq 0 \quad [2]$$

où $F_{X_n,i}$ est la fonction de répartition de désirabilité attachée à l'IP i .

Le coefficient β est utilisé pour pondérer la part de robustesse prise en compte dans l'évaluation de l'alternative. $\beta=0$ correspond à une aversion neutre face au risque où la variabilité de la performance n'est pas prise en compte, alors que $\beta>0$ traduit une aversion au risque d'autant plus forte que β est grand. Par l'intermédiaire de telles fonctions objectif, il est possible de trouver le meilleur compromis entre la performance et la variabilité de celle-ci. On peut noter que deux paramètres de modèle sont utilisés pour tenir compte de l'aversion au risque du décideur: le coefficient r qui agit sur l'intervalle de valeurs de désirabilités et le coefficient β qui exprime le poids attribué à la dispersion des valeurs de désirabilités.

4. Identification de la solution optimale

4.1. Optimisation multi-objectifs

4.1.1. Formulation du problème d'optimisation

L'optimisation multi-objectifs implique de trouver le meilleur compromis entre différents objectifs contradictoires. Le problème d'optimisation peut être défini comme:

$$\text{Optimiser } \vec{f}(\vec{x}_n) = [f_1(\vec{x}_n), \dots, f_i(\vec{x}_n), \dots, f_k(\vec{x}_n)] \quad [3]$$

$$\text{sous les contraintes } Q1[F_{X_n,i}] > 0 \quad \text{et} \quad \vec{x} \in E \quad (\text{espace de conception}) \quad [4]$$

où $Q1[F_{X_n,i}]$ est le premier quartile de la fonction de répartition des désirabilités sur l'IP i . Cette contrainte permet d'écartier un certain nombre d'alternatives dont le niveau de performance est d'ores et déjà jugé inacceptable sur l'objectif concerné.

Un vecteur de conception \vec{x}_1 domine au sens de Pareto un vecteur de conception \vec{x}_2 dans un contexte de maximisation, si et seulement si:

$$\forall i \in \{1, \dots, k\}, f_i(\vec{x}_1) \geq f_i(\vec{x}_2) \text{ and } \exists u \in \{1, \dots, k\}, f_u(\vec{x}_1) > f_u(\vec{x}_2) \quad [5]$$

Les alternatives présentant les "meilleurs compromis" sont situées sur un front de Pareto et forment l'ensemble de solutions non-dominées.

4.1.2. Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO)

L'algorithme d'optimisation par PSO développé par [KEN 95] et adapté aux problèmes multi-objectifs a été implémenté sous Matlab. Cet algorithme permet de faire évoluer dans l'espace de recherche un essaim de particules qui représente la population des alternatives. A chaque itération, les particules se déplacent suivant leur meilleure position passée (appelé *Personal best*) et suivant la meilleure position occupée dans l'essaim (appelé *Global best*). Dans le contexte multi-objectifs, une archive A contenant les solutions non-dominées au sens de Pareto est mise à jour à chaque itération. Pour chaque particule, le *Global best* est alors choisi aléatoirement à l'intérieur de cette archive.

A la fin du processus d'optimisation, on obtient un ensemble d'alternatives contenue dans A parmi lequel sera choisie la solution optimale. La figure 3 illustre le front de Pareto selon les dimensions de coût et de déplacement horizontal. Chaque point représente une particule définie par un ensemble de variables de conception. L'épaisseur du nuage et la forme du front s'expliquent par le caractère multi-objectifs du problème (telle qu'une représentation en deux dimensions est partielle) et par la discrétisation de l'espace de recherche. Sur la figure 3, deux objectifs contradictoires sont représentés avec un déplacement horizontal maximal d'autant plus satisfaisant que le coût augmente et que la structure est rigide.

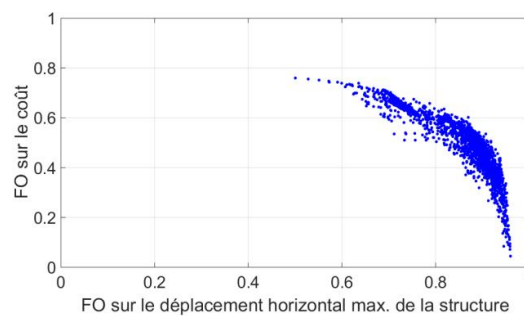


Figure 3. Distribution des particules sur le front de Pareto

4.2. Aide à la décision multicritère

Le choix de la solution optimale peut être fait grâce à une méthode d'aide à la décision multicritère. Il existe une multitude de méthodes basées sur des approches opérationnelles différentes et répondant à des problématiques distinctes. La méthode adoptée dans cette étude s'appuie sur PROMETHEE II développée par [BRA 85]. L'avantage de cette méthode est son faible niveau de complexité, qui la rend parfaitement compréhensible par le décideur et son aptitude à apporter une information claire sur les préférences entre alternatives. Elle utilise la méthodologie de surclassement pour classer un nombre fini d'alternatives en considérant différents objectifs.

Cette méthode fait intervenir, comme beaucoup d'autres, la pondération pour marquer les préférences entre objectifs. La pondération (cf. tableau 2) est définie en accord avec le décideur en utilisant la méthode de l'AHP [SAA 80]. Celle-ci permet de construire une matrice de jugement à partir de la comparaison deux à deux des objectifs en attribuant une note chiffrée pour formaliser l'importance relative que l'on accorde à un objectif par rapport à un autre (on sera par exemple plus strict vis à vis de la violation d'un objectif de sécurité que d'un objectif de délai).

Après application de la méthode de décision, nous obtenons la solution optimale suivante: une structure contreventée avec 6 poteaux HEB 120 assemblés par articulation avec des poutres IPE 270. Les fondations sont profondes de 0,6 m, de côtés 0,8 m pour les fondations extérieures et de côtés 0,7m pour les fondations intérieures. Des études menées en parallèle ont montré la grande influence des paramètres de modèles (forme des courbes de désirabilité, expression de la fonction objectif, pondération des objectifs) sur le choix de la solution optimale. Ainsi, dans le but d'aboutir au meilleur compromis possible, la structure de décision doit être fixée avec précaution et en accord avec le preneur de décision.

5. Effets de l'interaction sol-structure sur la solution optimale

Actuellement, le processus de conception d'un ouvrage est segmenté avec d'une part l'ingénieur structure qui définit le dimensionnement de la superstructure et d'autre part le géotechnicien qui s'occupe du comportement du massif de fondation. L'ingénieur de structure conduit ses calculs en définissant des conditions d'appuis (rotule, encastrement) supposés fixes puis, à partir de la descente de charge, l'ingénieur géotechnicien réalise son dimensionnement. En réalité, le sol se déforme sous l'action des efforts générés par la structure, ce qui induit des déplacements différentiels entre les appuis et affectent en retour la distribution des efforts dans la structure.

La solution optimale trouvée au §4.2 (appelée *O1*) tient compte des effets de l'interaction sol-structure (ISS) et se place dans des conditions plus proches de la réalité par rapport aux hypothèses de l'ingénieur. Pour comparer cette solution à celle qui serait trouvée sans prise en compte de l'ISS, nous optimisons la structure seule et obtenons une solution optimale *O2* en considérant un encastrement des appuis et en calculant les fondations à partir de la descente de charge induite. Au terme des calculs, on trouve une superstructure inchangée par rapport à *O1* et des massifs de fondation sous chaque appui de plus petite taille que précédemment avec des côtés 0,5 m et une profondeur 0,5 m. Cette solution est donc à priori moins coûteuse que la solution *O1*.

L'obtention de la même ossature pour les deux configurations testées montre que les tassements différentiels obtenus entre les appuis de *O1* (de l'ordre du millimètre) n'engendrent pas une redistribution des efforts suffisamment grande pour réévaluer *O2*. La figure 4 illustre la différence de contraintes en flexion composée obtenues dans *O1* et dans *O2*. On constate que dans cette configuration les effets de l'ISS sont davantage prépondérants en tête de poteaux (noté P1 à P6) qu'en milieu de travée (noté T1 à T5).

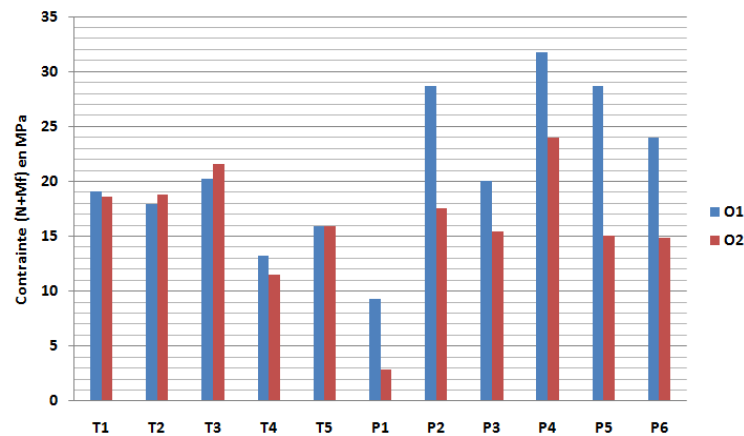


Figure 4. Contraintes de flexion composée dans *O1* et *O2*

La figure 5 illustre la réponse de l'ouvrage *O2* (en terme de fonctions objectif) dans les conditions plus proches de la réalité où l'ISS est prise en compte. On constate qu'en raison de fondations moins conséquentes, ce sont surtout les états limites des massifs de *O2* qui sont dégradés par rapport à *O1*, pour un faible gain sur l'objectif de coût. On peut imaginer que dans des conditions plus extrêmes, une redistribution des efforts plus préjudiciable dans *O1* ne pourrait être compensée par des fondations plus importantes et nécessiterait un redimensionnement de la superstructure.

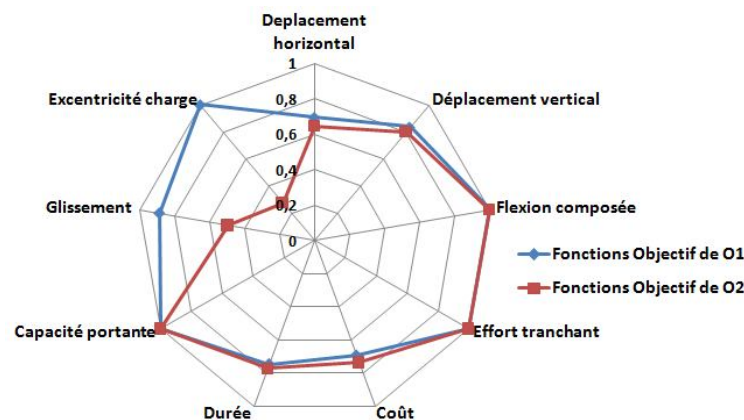


Figure 5. Evaluation de *O1* et *O2* en considérant l'ISS

6. Conclusion et perspectives

Nous avons exposé notre démarche d'optimisation pour une structure à ossature métallique reposant sur des fondations superficielles isolées. Les préférences du décideur sont intégrées tout au long du processus d'évaluation et de décision afin de converger vers le meilleur compromis entre différents objectifs contradictoires. Les objectifs sont représentés par des distributions de désirabilités obtenues par une méthode de simulation (LHS) et résultant du caractère stochastique des données d'entrée.

L'optimisation a été conduite en considérant les interactions pouvant exister entre le sol et l'ouvrage, ce qui nous place dans des conditions plus réalistes que dans les démarches classiques d'ingénierie. Les déplacements différentiels des appuis génèrent des efforts supplémentaires dans la structure qui modifient la configuration optimale de l'ouvrage par rapport au cas où la superstructure et l'infrastructure sont optimisées localement. Si la solution optimale trouvée pour la structure est peu affectée par la prise en compte de l'ISS, on montre que les objectifs liés au sol sont significativement moins bien satisfait lorsque l'on néglige l'ISS.

Pour améliorer le caractère optimal de la solution, on peut augmenter le nombre de variables entrant en jeu dans le processus de conception-réalisation. Une piste développée est la prise en compte de fondations profondes, qui permet d'étendre le champs des solutions techniques disponibles, tout en conservant un format identique pour la méthode d'optimisation et d'aide à la décision.

7. Remerciements

Nous tenons à remercier la société ASTF et le Conseil Régional d'Aquitaine pour leur soutien à ces travaux.

8. Bibliographie

- [APL 06] APLEY, D.W., LIU, J., CHEN, W., « Understanding the effects of model uncertainty in robust design with computer experiments », *Journal of Mechanical design*, 2006, p. 945-958.
- [BEL 09] BEL HADJ ALI, N., SELAMI, M., CUTTING-DECELLE, A.F., MANGIN, J.C., « Multi-stage production cost optimization of semi-rigid steel frames using genetic algorithms », *Engineering Structures* 31, 2009, p. 2766-2778.
- [BRA 85] BRANS, J., VINCKE, P., « A preference ranking organization method », *Management Science*, 1985, p. 647-656.
- [BRE 11] BREYSSE, D., « Reliability of a Shallow Foundation Footing ». Dans J. Baroth, F. Schoefs, et D. Breysse, *Construction Reliability: Safety, Variability and Sustainability* (p. 97-118). London: Wiley-ISTE, 2011.
- [CHE 00] CHERUBINI, C., « Reliability evaluation of shallow foundation bearing capacity on effective cohesion and friction angle soils », *Canadian Geotechnical Journal*, vol.37, 2000, p. 264-269.
- [DER 80] DERRINGER, G., SUICH, R., « Simultaneous Optimization of Several Response Variables », *Journal of Quality Technology*, Vol.12, No.4, 1980, p. 214-219.
- [EC3 05] EUROCODE 3. *Norme EN 1993-1: Calcul des structures en acier*. AFNOR, 2005.
- [EC7 05] EUROCODE 7. *Norme EN 1997-1: Calcul Géotechnique*. AFNOR, 2005.
- [JUA 12] JUANG, H. C., WANG, L., ATAMTURKTUR, S., LUO, Z., « Reliability-Based robust and optimal design of shallow foundations in cohesionless soil in the face of uncertainty », *Journal of GeoEngineering*, Vol.7, No.3, 2012, p. 75-87.
- [KEN 95] KENNEDY, J., EBERHART, R.C., « Particle swarm optimization », *Conf. on Neural Networks*, 1995, p. 1942-1948.
- [MYL 05] MYLONAKIS, G., NIKOLAOU, S., GAZETAS, G., « Footings under seismic loading: Analysis and design issues with emphasis on bridge foundations », *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 26, 2005, p. 824-853.
- [ORR 08] ORR, T., BREYSSE, D., « Eurocode 7 and reliability-based design ». Dans K.K. Phoon, *Reliability-based design in geotechnical engineering* (p. 298-343). New York: Taylor & Francis, 2008.
- [PHO 99] PHOON, K.-K., KULHAWY, F.H., « Evaluation of geotechnical property variability », *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.36, 1999, p. 625-639.
- [SAA 80] SAATY, T., *The analytic hierarchy process*. New York: McGraw-Hill, 1980.
- [WAN 08] WANG, Y., KULHAWY, F. H., « Economic Design Optimization of Foundations », *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 2008, p. 1097-1105.
- [WAN 11] WANG, Y., « Reliability-based design of spread foundations by Monte Carlo simulations », *Geotechnique*, Vol.61 No.8, 2011, p. 677-685.