



**Institut Supérieur
d'Informatique, de
Modélisation et de
leurs Applications**
Campus des Cézeaux
24, avenue des Landais
BP 10125
63173 Aubière



Valeo Systèmes d'Essuyage
1, avenue Pierre et Marie Curie
63500 Issoire

**Rapport d'ingénieur
Projet de deuxième année ISIMA
Filière Calcul et Modélisation scientifiques
RECONSTRUCTION DE POINTS MANQUANTS
D'UNE SURFACE DE REPONSE PAR LA MÉTHODE DU
KRIEGEAGE**

Présenté par : Marianne Lemoine et Yoan Liardet

Responsable ISIMA :
Gilles Leborgne

Date de la soutenance:
Vendredi 6 mars 2015

Responsable Valeo :
Sébastien Jallet

Durée du projet :
60 heures

Remerciements

Nous tenons à remercier notre responsable de projet chez Valeo, M. Sébastien Jallet qui nous a guidé pour ce projet. Nous tenons également à remercier notre responsable ISIMA, M. Gilles Leborgne.

Table des figures

- Figure 1 : organigramme de fonctionnement du groupe Valéo
- Figure 2 : Modélisation de l'expérience
- Figure 3 : Exemple de fichier ne contenant pas de valeurs
- Figure 4 : dossiers contenant des fichiers sans valeurs
- Figure 5 : effort de réaction sous la molette
- Figure 6 : dossiers classés selon la force appliquée
- Figure 7 : fichiers de données
- Figure 8 : Exemple de fichiers de données
- Figure 9 : exemple de courbe pour une force de 17.5 N/m et un rayon de 5000 mm
- Figure 10 : ensemble des courbes caractéristiques
- Figure 11 : ensemble des maxima en fonction des caractéristiques R et F
- Figure 12 : Diagramme de Gantt prévisionnel
- Figure 13 : Diagramme de Gantt effectif
- Figure 14 : lignes d'exécution pour la fonction de lecture
- Figure 15 : exemple de krigeage

Résumé

Le travail présenté dans ce rapport a été réalisé dans le cadre d'un projet de deuxième année d'école d'ingénieurs en informatique en collaboration avec l'entreprise Valéo implantée à Issoire. Cette entreprise est spécialisée dans la fabrication et la vente de composants automobiles. Les résultats d'expériences pratiquées par l'entreprise sur des **splines d'essuie-glaces** sont présentés dans ce rapport. Le travail se base sur les expériences de Malek Ben Salem et Safae Faraji, anciens étudiants de l'ISIMA.

Une **spline** est la partie métallique qui porte la partie en contact avec le pare-brise de la voiture. Les résultats des expériences qui ont été pratiquées et qui sont présentés dans ce rapport, portent sur cette partie de l'**essuie-glace**.

L'objectif de ce projet est de reconstruire un (des) point(s) manquant(s) par interpolation avec la méthode de **krigeage**. Ce travail a été réalisé à l'aide de la plateforme de calcul **Scilab**.

Mots-clés : Scilab, Krigeage, Spline, Essuie-glaces.

Abstract

The work presented in this report has been made as a second year software engineering project in collaboration with the Valeo Company, which is focused on designing, producing and selling automobiles' components. Experimental results obtained by the Company during tests on **windshield wipers splines** will be presented in this report. This work is based on a project made by Malek Ben Salem and Safae Faraji, former students of ISIMA.

A **spline** is the metallic part holding the rubber in contact with the **windshield**. The results of the experiences presented in this report are related to this part of the **windshield wipers**.

The objective of this project is to find one or many points missing by using the interpolation method called **kriging**. This work has been made with the help of calculus platform **Scilab**.

Key words: **Scilab, Kriging, Spline, Windshield wipers.**

Table des matières

Remerciements	i
Table des figures	ii
Résumé	iii
Abstract	iii
Table des matières	iv
Glossaire	vi
Introduction	1
I. Cadre du projet	2
1. Présentation de l'entreprise	2
2. Données de l'entreprise	4
a) Cas des fichiers sans valeurs présentes	4
b) Cas des fichiers avec des valeurs	5
c) Affichage d'une courbe caractéristique	9
3. Choix pour la résolution du problème	9
II. Conception d'une solution	10
1. Affichage de plusieurs courbes caractéristiques	10
2. Affichage de la surface de réponse	11
3. Introduction à la méthode de krigeage	14
4. Organisation du travail	17
a) Diagramme de Gantt prévisionnel	17
b) Diagramme de Gantt effectif	18
III. Résultats et discussions	20
1. Résultats obtenus	20
2. Difficultés rencontrées	20
a) Prise en main de Scilab	20
b) Compréhension de la méthode de krigeage	21
c) La bibliothèque DACE	21
Conclusion	23
Annexes	I
1. Fonction d'affichage d'une seule courbe	I
2. Fonction d'affichage des courbes superposées	I
3. Fonction d'affichage de la surface de réponse	II
4. Fonction de krigeage	III
5. Fonction DACEdemo	III

Bibliographie	V
---------------------	---

Glossaire

Combinaison linéaire : Si v_1, \dots, v_n sont des vecteurs et a_1, \dots, a_n des scalaires, alors la combinaison linéaire de ces vecteurs ayant comme coefficients ces scalaires est le vecteur $a_1v_1 + \dots + a_nv_n$.

Variable aléatoire (réelle) : Une variable aléatoire réelle est une application définie sur l'ensemble des possibles, et à valeur dans \mathbb{R} .

Réalisation : Une réalisation est le résultat de la variable aléatoire en un certain réel.

Espérance : L'espérance mathématique est la moyenne des valeurs pondérées que peut prendre la variable

Covariance : La covariance entre deux variables aléatoires permet de mesurer l'écart entre les espérances respectives.

Variance : Cette valeur indique comment sont réparties les valeurs autour de la moyenne.

Biais : C'est l'écart entre la valeur d'une variable inobservable et la valeur estimée statistiquement

Vraisemblance : La vraisemblance correspond au fait que le calcul s'approche du modèle théorique.

Relaxation Lagrangienne : Elle consiste à supprimer des contraintes difficiles en les intégrant dans la fonction objectif.

Introduction

Nous avons réalisé ce projet dans le cadre de notre deuxième année à l'Institut Supérieur d'Informatique, de Modélisation et de leurs Applications (ISIMA) . Ce projet a été réalisé en partenariat avec l'entreprise Valéo Systèmes d'Essuyage d'Issoire.

Le but de ce projet est de comprendre la méthode de krigage pour reconstituer un point manquant à partir des autres points dans le voisinage de celui-ci. Nous présenterons cette méthode dans le développement.

Nous commencerons dans un premier temps par présenter le cadre de ce projet, ensuite, nous présenterons la solution que nous avons adopté. Enfin, nous présenterons les résultats obtenus par la méthode de krigage.

I. Cadre du projet

1. Présentation de l'entreprise

Ce projet a été réalisé en partenariat avec l'entreprise Valéo Systèmes d'Essuyage. Ce groupe français est implanté dans une vingtaine de pays. Ce groupe emploie plus de soixante-dix milles personnes. Elle possède une centaine de centres de production, une soixantaine de centres de recherche et développement et neuf plateformes de distribution. Ce groupe est spécialisé dans la fabrication et la vente de composants pour l'automobile. La politique de Valéo s'inscrit dans une logique de développement durable. Les innovations techniques dans le domaine automobile sont nombreuses : les réductions des émissions de dioxyde de carbone (CO₂) sont, en effet, la base de l'innovation dans ce groupe. Le diagramme suivant montre le projet de baisse de ces émissions pour les dix années à venir :

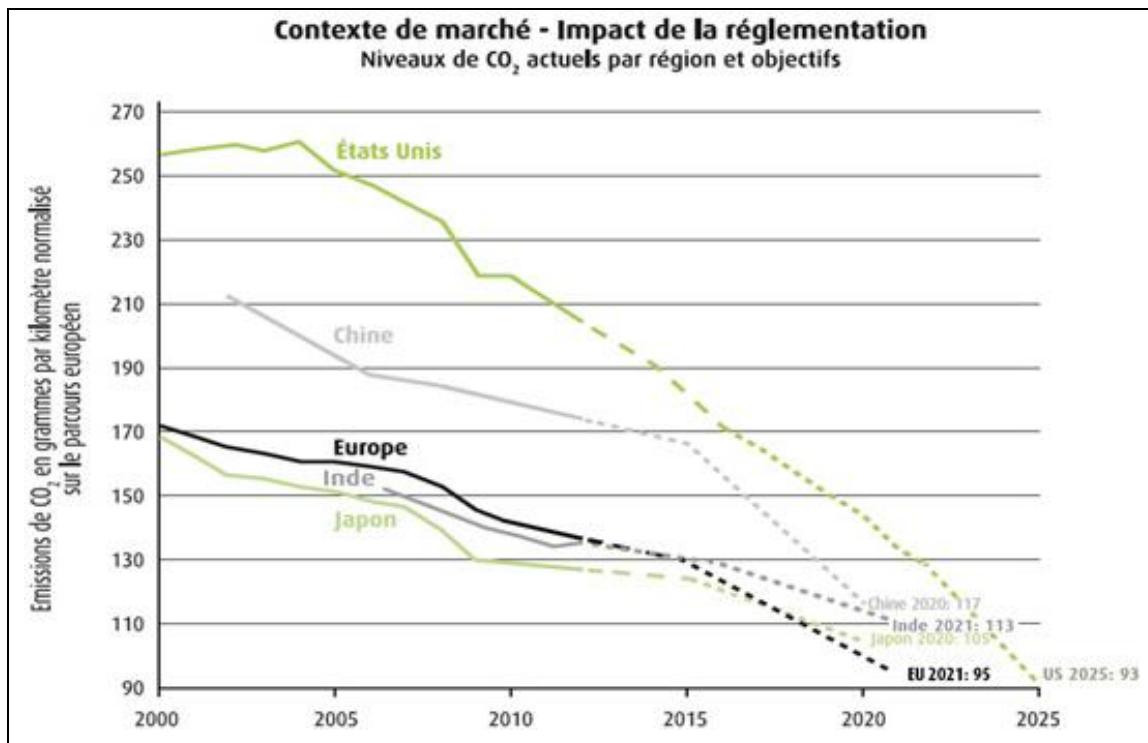


Figure 1 : organigramme de fonctionnement du groupe Valéo

La diminution des émissions de CO₂ se fait à plusieurs échelles : le groupe Valéo développe de nouveaux produits comme par exemple le system stop and start qui coupe le moteur quand la voiture s'immobilise, les phares à LED qui sont moins gourmandes en énergie.

Le centre avec lequel ce travail a été réalisé est le centre de recherche d'Issoire en Auvergne. Dans le cadre de son activité, le centre d'Issoire effectue des expériences sur des composants d'essuie-glaces. Les composants d'essuie-glaces sur lesquels ont été pratiquées les expériences sont les splines. Il s'agit de la partie métallique de part et d'autre des balais. Les splines sont caractérisées par leur rayon de courbure et leur longueur. A chaque valeur de rayon de courbure et de longueur est obtenue un ensemble de données. Ces tests visent à déterminer le comportement qu'elles ont lorsqu'elles sont soumises à une force de pression.

Un effort d'appui est appliqué sous le milieu de la spline. Une roulette de contrôle se déplace sous la spline. La figure suivante montre l'expérience qui a été réalisée :

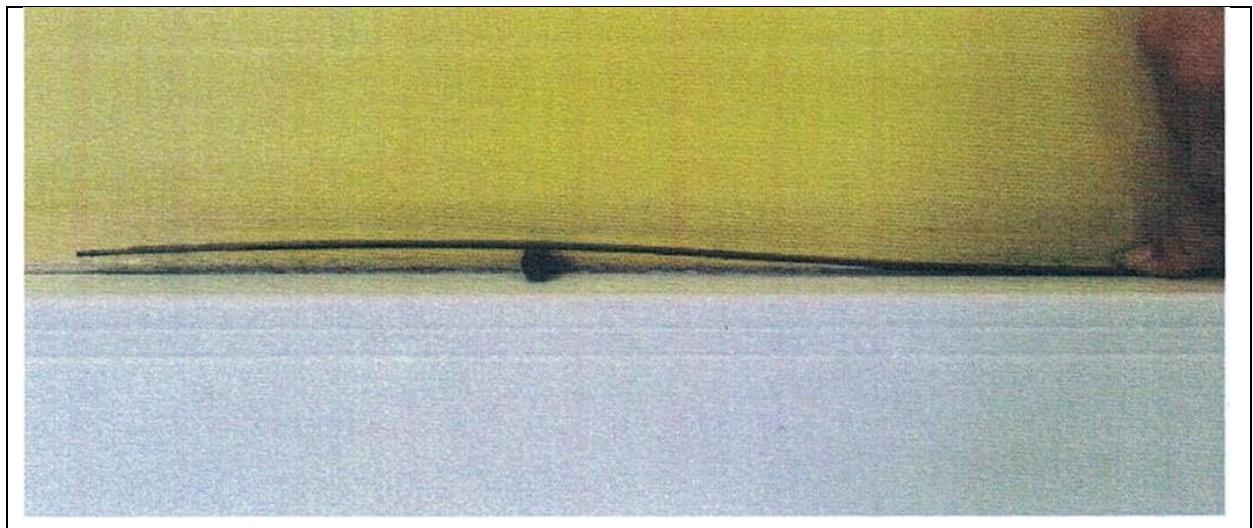


Figure 2 : Modélisation de l'expérience

L'objectif de ce projet est de mettre en place une méthode pour reconstituer des points aberrants ou des points manquants. Pour reconstruire de tels points, la mise en œuvre d'une méthode d'interpolation était nécessaire. Celle qui a été retenue était la méthode

d'interpolation par krigeage. Pour réaliser cette interpolation, l'utilisation de la plateforme de calculs Scilab était imposée dans les exigences du projet.

2. Données de l'entreprise

a) *Cas des fichiers sans valeurs présentes*

Les données fournies par l'entreprise étaient un ensemble de mesures pratiquées sur une spline d'essuie-glace. Afin d'exploiter ces mesures et d'appliquer la méthode du krigeage, il fallait utiliser la plateforme de calculs scientifiques Scilab (logiciel ayant un fonctionnement similaire à Matlab). Les expériences pratiquées par Valéo sont regroupées dans différents fichiers. Ces fichiers étaient regroupés dans un dossier nommé FB1-exemple. Chacun de ces fichiers comportent la longueur constante de la spline, la longueur de l'essuie-glace entre 2000 mm et 5000 mm avec un pas de 500 mm et la force de définition linéique qui varie entre 12 N/m et 18 N/m avec un pas de 0.5 N/m. Cependant, certains fichiers ne contenant pas de valeurs numériques, il n'était pas possible d'exploiter ces résultats.

```
File created on : Wed Jun 09 00:49:42 2010
by Flat Blade Calculations Procedures Version 2 Release 0

Blade type : FB1 [033.153]
Spline length (mm) : 605.00
Base radius (mm) : 2000.0
Spline Definition pressure (N/mm) : 0.014500

Test force (N) : 4.350
Gravity : Added

HISTORY PLOT
Analysis
Analysis
Analysis
Analysis
Analysis
Analysis
Analysis
Analysis
```

Figure 3 : Exemple de fichier ne contenant pas de valeurs

Les fichiers ne comportant pas de valeurs ont été mis dans les dossiers suivants. Par souci de simplicité, les fichiers ont été classés selon la force appliquée sur le pare-brise dans des dossiers portant des noms allant de f12 à f18. Les dossiers contenant des fichiers sans valeurs présentes sont présentés dans la figure suivante :



Figure 4 : dossiers contenant des fichiers sans valeurs

b) Cas des fichiers avec des valeurs

Dans le cas où des valeurs sont présentes dans les fichiers, l'effort de réaction calculé sous la molette peut se modéliser de la façon suivante :

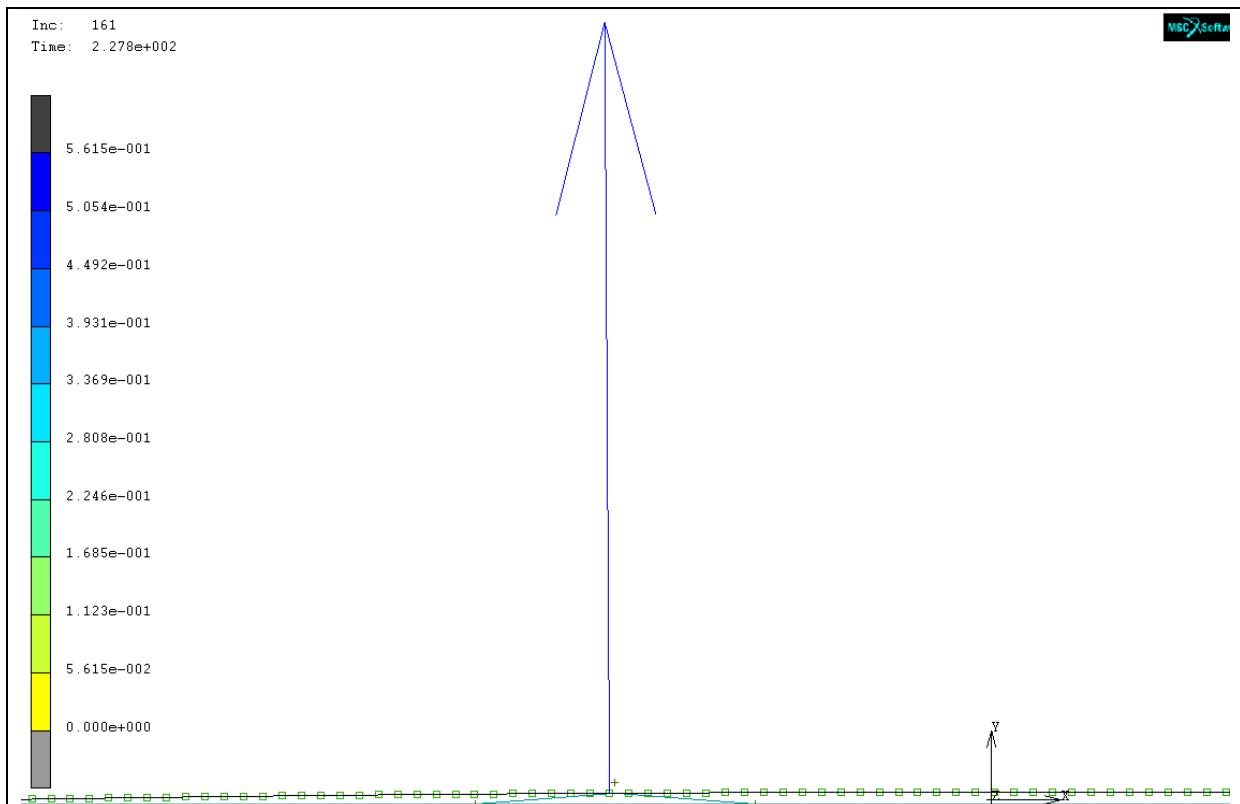


Figure 5 : effort de réaction sous la molette

La flèche verticale représente l'effort qui sera ensuite présentes dans les fichiers. Ces fichiers seront présentés ultérieurement.

La figure suivante présente l'ensemble des dossiers où les fichiers sont remplis avec des valeurs.

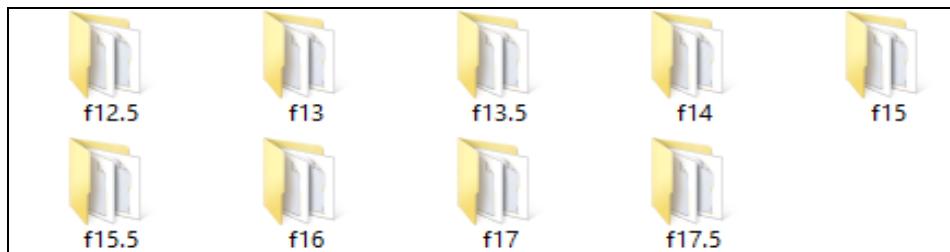


Figure 6 : dossiers classés selon la force appliquée

Ces dossiers contiennent chacun neuf fichiers différents. La force caractéristique F reste constante tandis que le rayon varie de 2000 mm à 5000 mm avec un pas de 500 mm. Dans la suite, le travail est limité à ces fichiers.



Figure 7 : fichiers de données

Toutes les données des expériences sont regroupées dans un fichier texte où figurent la longueur caractéristique R et la force F. Dans l'exemple qui suit, le fichier présenté est celui pour lequel R vaut 5000 mm et F vaut 17.5 N/m. Ces nombres sont présents dans les deux premières lignes du fichier (comportant "base radius" et "spline definition pressure") présenté ci-après. La force F, dans les fichiers, est en N/mm, il faut la multiplier par 1000 à chaque fois pour obtenir le même nombre que celui figurant dans le titre du fichier. La longueur de la spline est, quant à elle, constante pour toutes les expériences (elle vaut 605 mm). La spline étant symétrique, chaque fichier ne présente des mesures que pour une position X variant de -302.5 mm à 0 mm. Les valeurs Y sont les résultats des mesures pratiquées par l'entreprise, Y est une force donc son unité est le Newton (N).

Base radius	(mm):	5000.0
Spline Definition pressure (N/mm):		0.017500
Test force	(N):	5.250
Gravity	:	Added
HISTORY PLOT		
Analysis		
Curve 1		
X : Pos X sensor [0]		
Y : Force sensor [0]		
X	Y	

-302.50	0.644076	
-300.00	0.666064	
-297.50	0.681189	
-295.00	0.714692	
-292.50	0.730012	
-290.00	0.765555	
-287.50	0.781886	
-285.00	0.818951	
-282.50	0.836337	
-280.00	0.875822	
-277.50	0.893027	
-275.00	0.935351	
-272.50	0.954695	
-270.00	0.997936	
-267.50	1.018317	
-265.00	1.061704	
-262.50	1.083202	
-260.00	1.130322	
-257.50	1.152961	
-255.00	1.178625	
-252.50	1.135050	

Figure 8 : Exemple de fichiers de données

c) Affichage d'une courbe caractéristique

Le point encadré en rouge sur le fichier précédent correspond à un maximum local. Le point encadré précédemment correspond à celui entouré sur le graphique ci-après. L'appel de la fonction *affiche* donne le résultat suivant à l'écran :

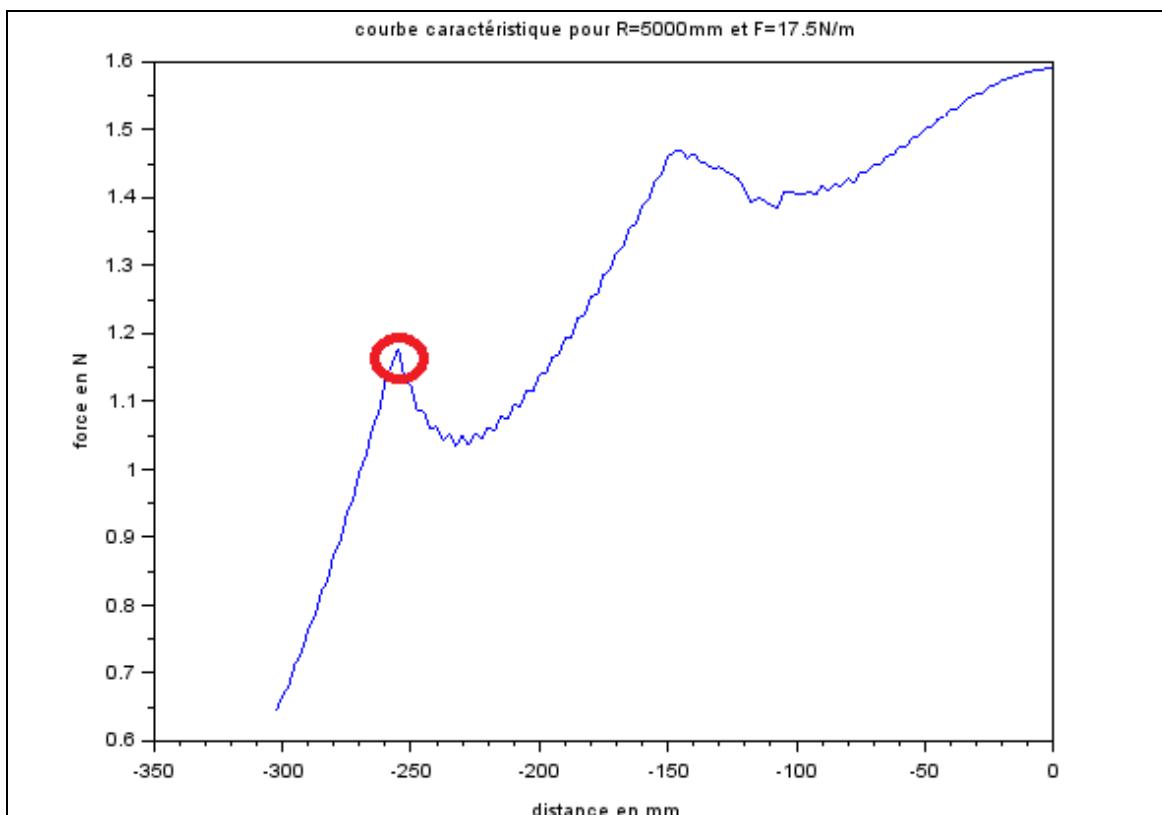


Figure 9 : exemple de courbe pour une force de 17.5 N/m et un rayon de 5000 mm

3. Choix pour la résolution du problème

Pour résoudre ce problème, il fallait exploiter les données fournies par le site d'Issoire. Ce projet devait être en relation avec le projet réalisé par Malek Ben Salem et Safae Faraji en 2013. Le projet qu'ils ont réalisé a servi de base pour le travail qui était à effectuer. Cependant, les fonctions et scripts ayant été implémentés sous Matlab, il n'était pas

envisageable de reprendre des parties du code qu'ils ont réalisé. De plus, les plateformes Matlab et Scilab étant quelque peu différentes, les fonctions l'étaient également. C'est pour cette raison qu'il a été choisi de développer de nouvelles fonctions.

II. Conception d'une solution

1. Affichage de plusieurs courbes caractéristiques

Les courbes caractéristiques affichées dans un premier temps sont les fonctions ayant une valeur de R et une valeur de F fortes. Par exemple, le premier fichier à être traité lors de l'exécution du programme est le fichier pour lequel R vaut 5000 mm et F vaut 17.5 N/m et le dernier à être lu est celui pour lequel R vaut 2000 mm et F vaut 12.5 N/m. Pour obtenir l'ensemble de ces courbes, il faut exécuter la fonction *lire*. En rouge, sur la figure suivante sont encadrés l'ensemble des maxima locaux qui sont utilisés pour réaliser le krigage.

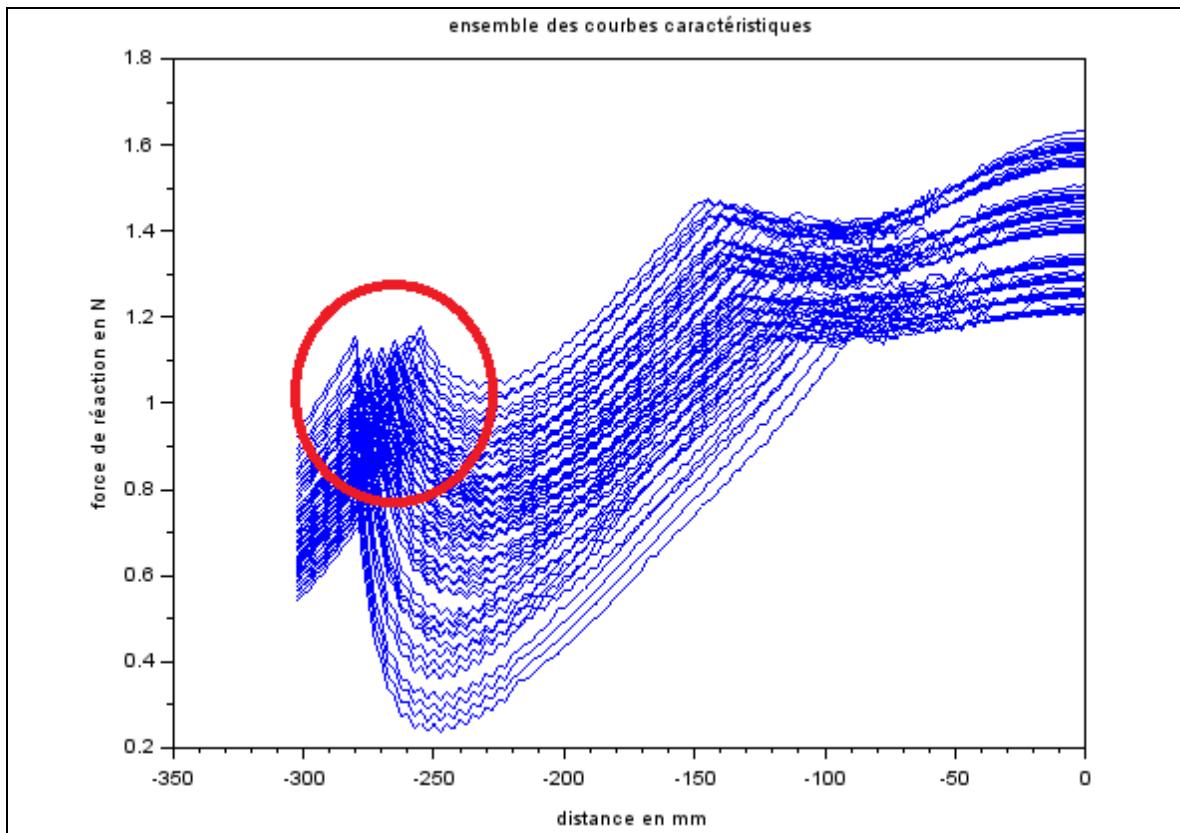


Figure 10 : ensemble des courbes caractéristiques

2. Affichage de la surface de réponse

Cet affichage étant peu lisible et peu exploitable, il faut tracer une surface ne comportant que les maxima entourés en rouge sur la figure 7, en fonction des forces et rayons caractéristiques. Un changement d'échelle a été effectué : les rayons caractéristiques sont en décimètre sur la figure suivante, car la lecture et l'exploitation de la surface n'était pas possible en restant en millimètre. La force caractéristique F reste, quant à elle, en newton et les maxima sont également dans cette unité.

Sur chacune des représentations graphiques des courbes caractéristiques se trouve un maximum entre -300 mm et -250 mm. Dans les fichiers de données, il suffit de chercher les

maxima sur les vingt-deux premières lignes pour X. C'est pour cette raison qu'il faut se limiter à ces premières lignes pour la recherche du maximum local, le fichier contient en effet plusieurs autres maxima (il y en a un autour de -150 mm et un autre à 0 mm). Pour obtenir la surface de la figure suivante, il faut exécuter la fonction *lecture_win*.

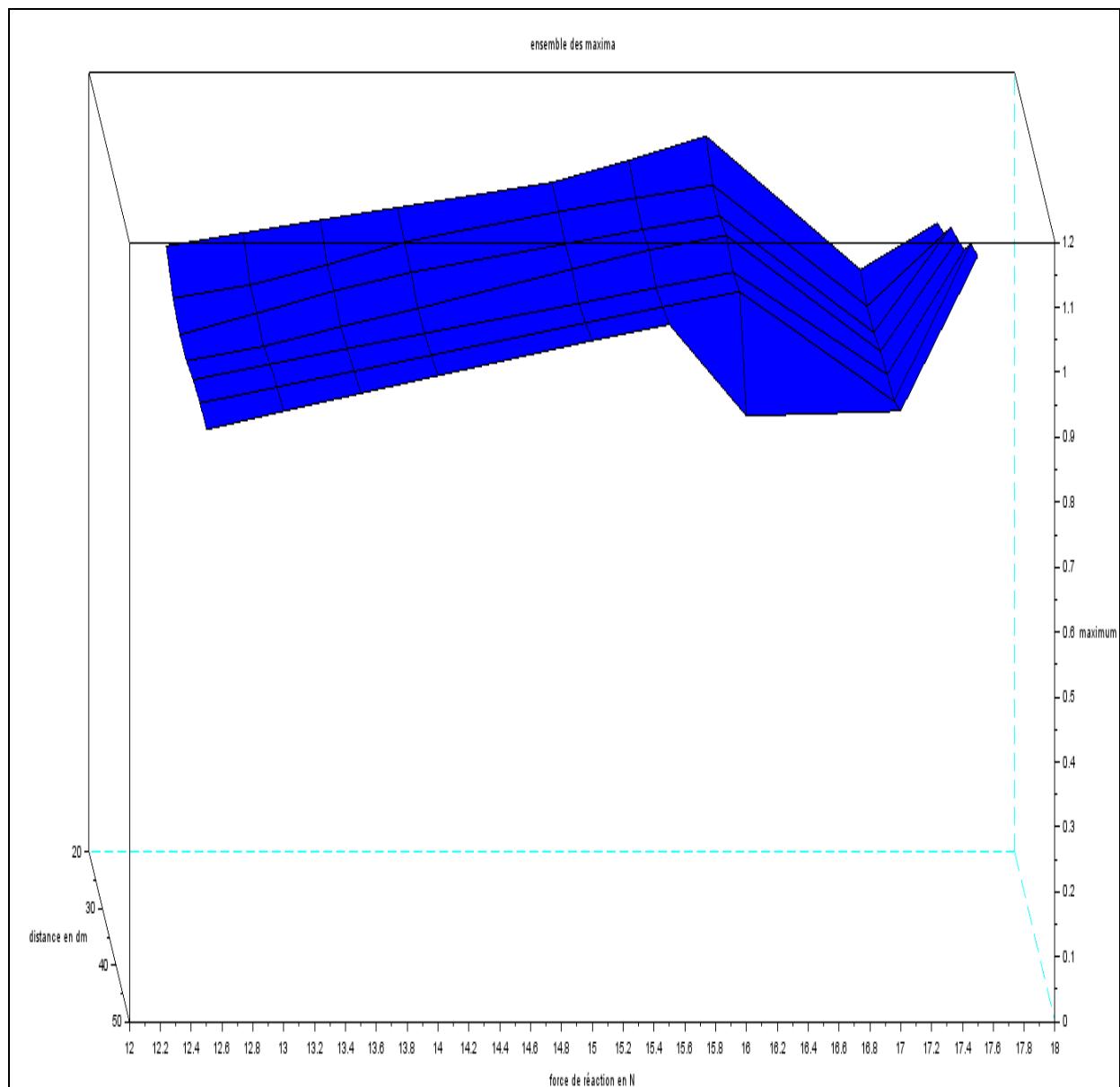


Figure 11 : ensemble des maxima en fonction des caractéristiques R et F

La figure précédente présente entre 12.5 N et 15 N une surface où le gradient est faible. Sur cette partie du graphique, il sera aisé de faire une interpolation. Le coefficient de corr ation entre la mesure effectué par l'entreprise et le résultat de la méthode de krigeage sera proche de 1. En revanche, entre 15 N et 18 N, le gradient est plus fort. Il sera plus difficile de faire une bonne interpolation entre ces deux valeurs. Le coefficient de corr ation entre le point mesuré par l'entreprise et celui obtenu par la méthode de krigeage sera plus faible.

3. Introduction à la méthode de krigeage

On s'intéresse à un phénomène physique que l'on peut mesurer (par exemple l'altitude). On modélise ce phénomène par une fonction v de D dans \mathbb{R} où D est un ensemble inclus dans R^n (pour faciliter la visualisation on posera $n=2$). Les seules informations à disposition sont les valeurs de v en différents points de D appelés sites, notés s_i . Le but est de trouver une valeur approchée de $v(s_0)$ où s_0 est un point de D .

La méthode dite du krigeage va fournir une estimation de $v(s_0)$ à partir d'une combinaison linéaire des valeurs de v aux sites s_i , $v(s_i)$. Soit w le vecteur des poids. On a donc :

$$\hat{v}(s_0) = \sum_{i=1}^n w_i * v(s_i).$$

Pour évaluer (s_0) , il suffit donc de déterminer les w_i . Mais cette détermination ne se fait pas de manière arbitraire. En suivant la méthode du krigeage, les w_i sont déterminés de façon à ce que $\hat{v}(s_0)$ soit non-biais  et qu'elle ait le plus de vraisemblance possible.

On traite le caractère non-biais  de la solution en ajoutant une contrainte sur les poids : leur somme doit être égale à un. Pour maximiser la vraisemblance, on probabilise le problème en considérant une variable aléatoire V dont v est une réalisation. C'est à dire que l'on considère que le phénomène observé comporte une part de hasard et que l'on observe une de ses réalisations. On définit \hat{V} de la même manière que \hat{v} . On a donc :

$$\hat{V}(s_0) = \sum_{i=1}^n w_i * V(s_i)$$

On ajoute une autre hypothèse : V est stationnaire d'ordre 2. C'est à dire que l'espérance de V est nulle quelque soit s_i , et que pour deux sites s_i et s_j quelconques dans D la covariance entre $V(s_i)$ et $V(s_j)$ ne dépend que de la distance entre s_i et s_j , notée h . On introduit

ensuite l'erreur R : $R(s_i) = \hat{V}(s_i) - V(s_i)$. On ne peut pas minimiser R directement puisque l'on ne connaît pas les $V(s_0)$. On va donc calculer la variance de R :

$$\text{Var}\{R(s_0)\} = \text{Cov}\{\hat{V}(s_0)^* \hat{V}(s_0)\} - 2 \text{Cov}\{\hat{V}(s_0)^* V(s_0)\} + \text{Cov}\{V(s_0)^* V(s_0)\}.$$

En posant :

$$\text{Var}\{R(s_0)\} = \tilde{\sigma}_R^2$$

$$\text{Var}\{V(s_0)\} = \tilde{\sigma}^2$$

$$\text{Cov}\{\hat{V}(s_i), \hat{V}(s_j)\} = \tilde{C}_{ij}$$

On obtient :

$$\tilde{\sigma}_R^2 = \tilde{\sigma}^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_i w_j \tilde{C}_{ij} - 2 \sum_{i=1}^n w_i \tilde{C}_{i0}$$

Une fois la variance de $R(s_0)$ exprimée de façon à ce que les seules inconnues soient les poids, on peut effectuer la minimisation de cette variance à l'aide d'une relaxation lagrangienne. On utilise la contrainte de non-biais pour introduire le paramètre de Lagrange dans la variance de $R(s_0)$.

La contrainte de non-biais est :

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1$$

La variance de $R(s_0)$ est donc :

$$\tilde{\sigma}_R^2 = \tilde{\sigma}^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_i w_j \tilde{C}_{ij} - 2 \sum_{i=1}^n w_i \tilde{C}_{i0} + 2\mu \underbrace{\left(\sum_{i=1}^n w_i - 1 \right)}_0$$

On minimise ensuite en calculant les dérivées partielles de $\text{Var}(R(s_0))$ selon les w_i et les mettant à zéro.

$$\begin{aligned}\frac{\partial(\tilde{\sigma}_R^2)}{\partial w_1} &= 2 \sum_{j=1}^n w_j \tilde{C}_{1j} - 2\tilde{C}_{10} + 2\mu = 0 \Rightarrow \sum_{j=1}^n w_j \tilde{C}_{1j} + \mu = \tilde{C}_{10} \\ &\vdots \\ \frac{\partial(\tilde{\sigma}_R^2)}{\partial w_i} &= 2 \sum_{j=1}^n w_j \tilde{C}_{ij} - 2\tilde{C}_{i0} + 2\mu = 0 \Rightarrow \sum_{j=1}^n w_j \tilde{C}_{ij} + \mu = \tilde{C}_{i0} \\ &\vdots \\ \frac{\partial(\tilde{\sigma}_R^2)}{\partial w_n} &= 2 \sum_{j=1}^n w_j \tilde{C}_{nj} - 2\tilde{C}_{n0} + 2\mu = 0 \Rightarrow \sum_{j=1}^n w_j \tilde{C}_{nj} + \mu = \tilde{C}_{n0}\end{aligned}$$

On obtient ainsi, en rajoutant la contrainte de non-biais, un système linéaire à $n+1$ inconnues $C^*w=D$ où C est une matrice et D un vecteur. On peut donc calculer facilement w en inversant C .

$$\underbrace{\mathbf{C}}_{(n+1) \times (n+1)} \cdot \underbrace{\mathbf{w}}_{(n+1) \times 1} = \underbrace{\mathbf{D}}_{(n+1) \times 1}$$

$$\left[\begin{array}{cccc} \tilde{C}_{11} & \cdots & \tilde{C}_{1n} & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \tilde{C}_{n1} & \cdots & \tilde{C}_{nn} & 1 \\ 1 & \cdots & 1 & 0 \end{array} \right] \cdot \left[\begin{array}{c} w_1 \\ \vdots \\ w_n \\ \mu \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \tilde{C}_{10} \\ \vdots \\ \tilde{C}_{n0} \\ 1 \end{array} \right]$$

Il ne reste donc plus qu'à choisir les $n*(n+1)$ covariances présentes dans C et D . Ce choix permet de déterminer quelle influence auront les sites voisins du site s_0 . En pratique, une fonction de covariance du type exponentielle est utilisée :

$$C(h) = C1 * \exp(\theta * |h|).$$

Le paramètre θ permet de déterminer la portée de l'action de la valeur du site. Plus θ est grand, plus le site est influent sur les sites alentours. Le paramètre C_1 est une constante telle que : $C(0)=C_1$

4. Organisation du travail

a) *Diagramme de Gantt prévisionnel*

Le travail sur ce projet a été démarré en semaine 43 du mois d'octobre 2014. La semaine 0 marque le début du travail. La fin du travail était initialement prévue en semaine 5 du mois de janvier 2015. Le diagramme de Gantt ci-après montre l'évolution du projet telle qu'elle était initialement prévue. Sur ce diagramme, apparaît en bleu la durée. Il s'agit de la durée en nombre de semaines.

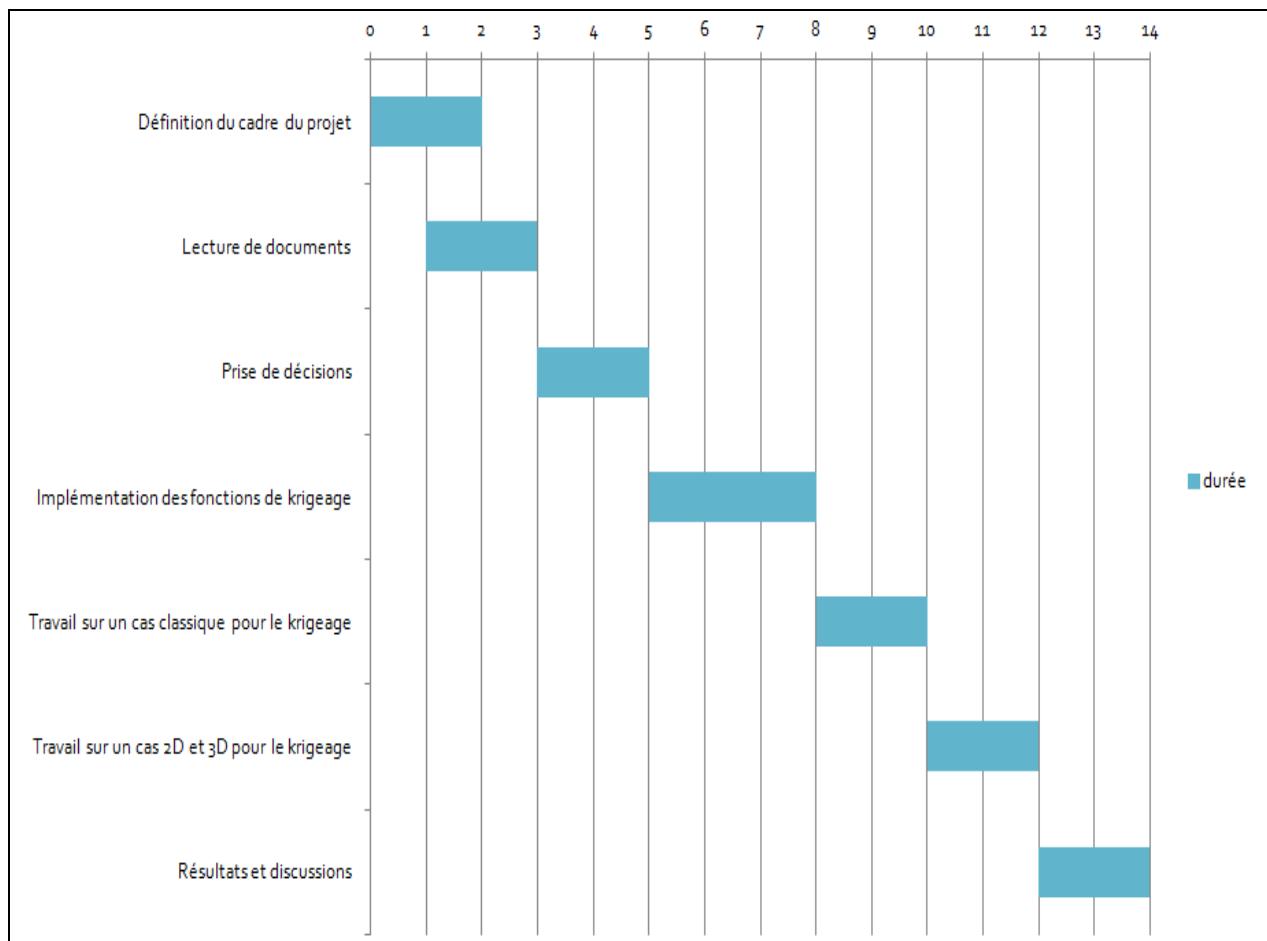


Figure 12 : Diagramme de Gantt prévisionnel

b) Diagramme de Gantt effectif

Le travail finalement effectué est présenté dans le diagramme de Gantt suivant : les choix du diagramme effectif diffèrent du diagramme prévisionnel. Dans un premier temps, il avait été prévu de faire une interpolation par la méthode de krigage et une interpolation par la méthode barycentrique. Il a finalement été choisi de se concentrer seulement sur la méthode de krigage. Comme précédemment, la semaine 0 est la semaine 43 de l'année 2014, et la semaine 16 est la semaine 7 de l'année 2015. Le retard de deux semaines par rapport à la fin prévisionnelle s'explique par la difficulté de la prise en main de Scilab, la difficulté de

compréhension de la méthode de krigage. De même que précédemment, la durée qui apparaît sur la droite du graphique est une durée en nombre de semaines.

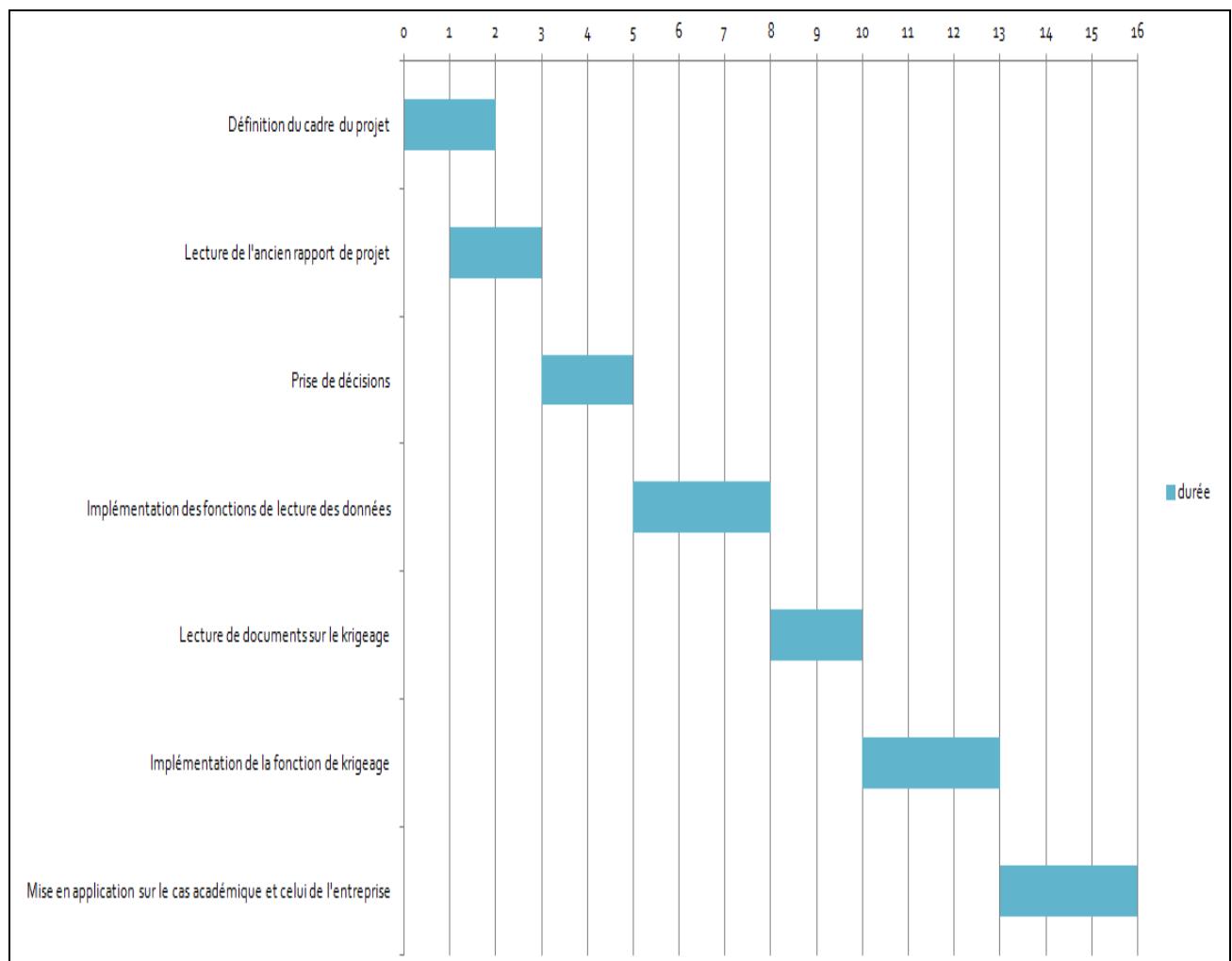


Figure 13 : Diagramme de Gantt effectif

III. Résultats et discussions

1. Résultats obtenus

Afin de réaliser des estimations des maxima pour les jeux de données qui ont été retirés, les fonctions dacefit et predictor de la bibliothèque DACE ont été utilisées. On a pu ainsi comparer la valeur estimée et la valeur mesurée. Pour un maxima se situant dans la zone de faibles gradients l'écart entre la valeur mesurée et la valeur estimée est faible. Par contre, pour un maxima situé dans la zone de forts gradients on observe un écart important. De ces observations plusieurs possibilités sont envisageables : soit la conception du modèle liée à la fonction de covariance ne colle pas correctement à la géométrie du problème ce qui entraîne la prise en compte de sites non pertinents, soit la mesure est tout simplement aberrante. Dans le premier cas, il faudrait simplement modifier les paramètres de la fonction ou la changer complètement. Dans le dernier cas le méthode du krigage permettrait de corriger les mesures en remplaçant les valeurs aberrantes par des valeurs plus vraisemblables, et cela de manière automatique via un programme.

2. Difficultés rencontrées

a) *Prise en main de Scilab*

Une des principales difficultés rencontrées dans ce projet a été la prise en main de la plateforme de calculs scientifiques Scilab. Parmi les enseignements dispensés dans la filière calculs et modélisation scientifiques (F4) de l'ISIMA (Institut Supérieur d'Informatique, de Modélisation et de leurs Applications) figure notamment un cours de Matlab présenté au premier semestre de deuxième année. La plateforme Scilab ayant le même comportement que Matlab, la difficulté venait du fait que certaines instructions de Matlab ne s'écrivent pas de la même façon pour Scilab. Ainsi, l'aide de Scilab a été très utile pour convertir certaines commandes de Matlab. Tandis qu'avec Matlab une seule ligne est nécessaire pour l'exécution d'un script, il faut entrer deux lignes dans la console Scilab. La figure suivante montre les deux lignes à entrer dans la console.

```
exec ('D:\marianne\isima\zz2\projet\projetZZ2\lire.sce', -1)  
lire('D:\marianne\isima\zz2\projet\projetZZ2\FB1-EXAMPLE')
```

Figure 14 : lignes d'exécution pour la fonction de lecture

b) Compréhension de la méthode de krigeage

Lors de l'utilisation de la méthode du Krigeage, plusieurs problèmes liés à la géométrie de la répartition des sites et de leurs valeurs peuvent apparaître. Le plus courant est lié à la distance entre les sites. L'ordre de grandeur d'une coordonnée peut être beaucoup plus importante (un facteur 1000 par exemple) que celui de l'autre. Ainsi, une petite variation dans les coordonnées entraîne un grand écart dans la distance h . Elle n'est alors pas représentative de l'écart réel entre les sites.

Pour palier à ce problème, on normalise les distances entre les sites. La bibliothèque DACE fait cela automatiquement. Le deuxième problème très souvent rencontré est celui de l'anisotropie des valeurs : elles sont réparties selon une ou plusieurs directions géométriques précises. Pour être le plus fidèle possible, le modèle utilisé pour V (matrice de covariance) doit en tenir compte. L'hypothèse de stationnarité d'ordre 2 n'est donc plus valable. (C ne dépend plus que de h). Ce problème est traité en combinant plusieurs variogramme en un seul. La bibliothèque DACE gère aussi ce problème.

c) La bibliothèque DACE

Afin d'effectuer une interpolation par la méthode du krigeage, il faut télécharger la bibliothèque Dace de Scilab. Pour implémenter la fonction de krigeage, une aide de Scilab était disponible. En effet, le fichier DACEdemo.sce présentait un exemple d'interpolation. L'exemple donné a été utilisé pour comprendre comment réaliser la fonction de krigeage sur les données de l'entreprise et sur un cas élémentaire.

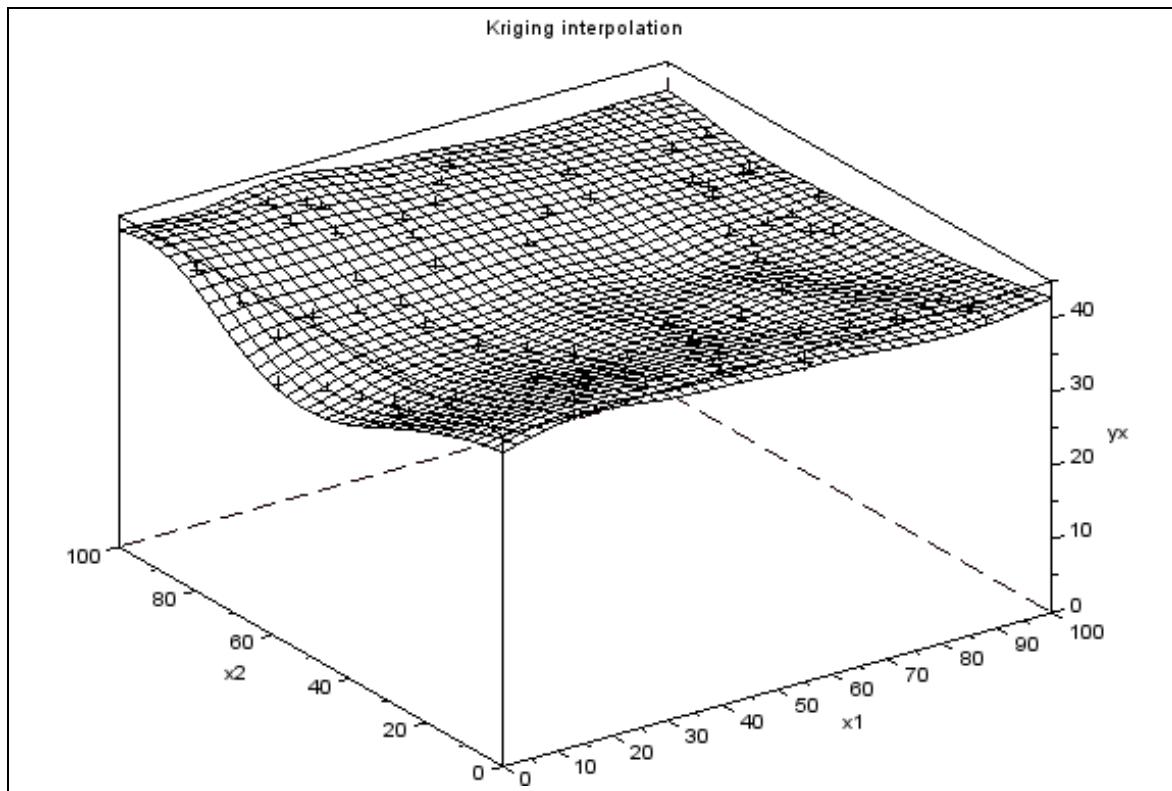


Figure 15 : exemple de krigeage

L'exemple précédent présente l'affichage d'une courbe d'interpolation sur les données fournies en annexe. Afin de créer la fonction de krigeage dans le cadre de ce projet, il fallait adapter le code de la fonction DACEdemo.sce. Des fonctions utilisées par la plateforme Scilab telles que *dacefit* et *predictor* étaient présentes dans cette fonction de démonstration. Ces deux fonctions sont les principales à utiliser quand il s'agit de faire une interpolation avec la méthode de krigeage. Ces fonctions prennent toutes deux plusieurs paramètres qu'il a fallu adapter aux cas étudiés.

Conclusion

Le but de ce projet était de mettre en œuvre la méthode d'interpolation par krigage. Un programme développé avec la plateforme de calcul Scilab devait répondre à ce problème. Les objectifs de ce projet ont été remplis et les résultats sont ceux qui étaient attendus.

Cependant, la mise en place de cette méthode et la compréhension de celle-ci étaient les difficultés principales de ce projet. En lisant certains documents présentés en annexe, la compréhension des objectifs du projet était plus facile.

Ce projet a permis de découvrir une autre méthode d'interpolation. Cette méthode n'est pas présentée dans les cours dispensés à l'ISIMA.

L'objectif du projet étant atteint, on pourrait proposer d'implémenter une application qui serait capable de récupérer les mesures réalisées lors d'expériences, d'afficher les surfaces de réponse, d'effectuer un krigage pour déterminer les points aberrants et de remplacer les valeurs aberrantes par des valeurs plus vraisemblables.

Annexes

1. Fonction d'affichage d'une seule courbe

```
//fonction de lecture d'un seul fichier de données
//Auteurs : Yoan Liardet, Marianne Lemoine

function affiche(dossier)
    cd(dossier);
    nom_dossier=ls(); //liste des noms de dossiers

    cd(nom_dossier(1)); //on prend le 1er dossier
    nom_fichiers=ls(); //liste des fichiers dans ce dossier

    M=fscanfMat(nom_fichiers(1)); //lecture d'un fichier
    plot(M(:,1),M(:,2)); // représentation d'une courbe
    title('courbe caractéristique pour R=5000mm et F=17.5N/m');
    xlabel('distance en mm'); //titre de l'axe X
    ylabel('force en N'); //titre de l'axe Y
endfunction
```

2. Fonction d'affichage des courbes superposées

```
//fonction lecture des fichiers de données
//et d'affichage de ces courbes
//Auteurs : Marianne Lemoine et Yoan Liardet
```

```
function lire(dossier)

    cd (dossier);
    nom_dossiers=ls(); //stockage
    N=size(nom_dossiers); //taille du vecteur des noms des dossiers
    for i=1:N(1)
        cd(nom_dossiers(i)); //lecture des dossiers un par un
        nom_fichiers=ls(); //liste des noms de fichiers
        P=size(nom_fichiers); //taille du vecteur des noms de fichiers
        for j=1:P(1)
            M=fscanfMat(nom_fichiers(j));
        //lecture des fichiers un par un
        plot(M(:,1),M(:,2));
        // représentation de toutes les courbes
```

```

        end
        cd ..;
//changement de dossiers et on passe au suivant s'il y en a encore
end
title('ensemble des courbes caractéristiques');
//titre de la courbe
xlabel('distance en mm');//titre de l'axe X
ylabel('force de réaction en N');//titre de l'axe Y
endfunction

```

3. Fonction d'affichage de la surface de réponse

```

//fonction de recherche des maxima
//Auteurs : Yoan Liardet, Marianne Lemoine

function [R, F, v]=lecture_win(dossier)

cd(dossier); //ouverture du dossier

nom_dossiers=ls(); //stockage
N=size(nom_dossiers); //taille du vecteur des noms des dossiers
indices=[1:22]'; //vecteur d'indices pour la sélection
for i=1:N(1)
    cd(nom_dossiers(i)); //lecture des dossiers un par un
    nom_fichiers=ls(); //liste des noms de fichiers
    P=size(nom_fichiers); //taille du vecteur des noms de fichiers
    for j=1:P(1)
        M=fscanfMat(nom_fichiers(j));
    //récupération des données dans le fichier
        v(j+(i-1)*P)=max(M(indices,2));
    //recherche du maximum sur les 22 premiers indices
    end
    cd ..;
//changement de dossier et on passe au suivant s'il y en a encore
end

R=[50:-5:20]; //R sur l'axe des Y du graphe (échelle 10^2)
F=[17.5 17 16 15.5 15 14 13.5 13 12.5];
//F sur l'axe des X du graphe
maximum=matrix(v, length(R), length(F));
//Redimensionnement du vecteur des maxima pour obtenir une matrice
title('ensemble des maxima');//titre du graphique
xlabel('distance en dm');//titre des axes

```

```

    ylabel('force de réaction en N');
    zlabel('maximum');
    plot3d(R,F,maximum); //affichage
endfunction

```

4. Fonction de krigeage

```

//fonction de krigeage
//Auteurs : Lemoine Liardet

function krigeage(dossier)
    [R,F,v]=lecture_win(dossier); //appel de la fonction de lecture
    //R rayon caractéristique, F force caractéristique
    S=zeros(length(F)*length(R),2);
    //initialisation d'une matrice length(R)
    // nombre de valeur dans R et length(F) nombre de valeur dans F
    for i=1:length(F)
        for j=1:length(R)
            S(j+(i-1)*length(R),1)=F(i);
        //les forces dans la 1ere colonne de la matrice
        S(j+(i-1)*length(R),2)=R(j);
        //les rayons dans la 2eme colonne de la matrice
        end
    end
    [dmodel,perf]=dacefit(S,v,regpoly2,correxp,0.1,0.01,200);
    x=[16.5 45]; //choix de la valeur où l'on fait l'interpolation
    [y, or1, or2, dmse]=predictor(x, dmodel);
    disp(y); //affichage de la valeur obtenue par interpolation
endfunction

```

5. Fonction DACEdemo

```

DACEPath = get_absolute_file_path('DACEdemo.sce');

loadmatfile(DACEPath + 'data1.mat');
theta = [10 10];
lob   = [0.1 0.1];
upb   = [20 20];

[dmodel,perf] = dacefit(S, Y, regpoly0, corrgauss, theta, lob, upb);

```

```

X = gridsamp([0 0; 100 100], [40 40]);
[YX] = predictor(X, dmodel);

X1 = matrix(X(:,1), 40, 40);
X2 = matrix(X(:,2), 40, 40);
YX = matrix(YX, size(X1,1), size(X1,2));

h = scf();
drawlater;
param3d1(S(:,1), S(:,2), list(Y,-1));
Color = 127*((YX - min(YX)) / (max(YX) - min(YX))) + 1;
xset('colormap',hotcolormap(128));
mesh(X1,X2,YX);
xtitle('Kriging interpolation','x1','x2','yx');
drawnow;

[emodel,perf] = dacefit(S, Y, regpoly0, corrgauss, 2);
[tmp,MSE] = predictor(X, dmodel);
printf('max MSE = %f - min MSE = %f\n', max(MSE), min(MSE));

h = scf();
drawlater;
mesh(X1,X2,matrix(MSE,size(X1,1),size(X1,2)));
xtitle('Variance of the kriging model','x1','x2','mse');
drawnow;

[y,dy] = predictor(S(1,:),dmodel);
printf('y = %f - should be 34.1\n',y);
printf('dy = '); disp(dy); printf('should be [0.2526 0.1774]\n');

[y,dy,mse,dmse] = predictor([50 50],dmodel);
printf('y = %f - should be 38.0610\n',y);
printf('dy = '); disp(dy); printf('should be [-0.0141 -0.0431]\n');
printf('mse = %f - should be 0.7526\n',mse);
printf('dmse = '); disp(dmse); printf('should be [0.0004 0.0187]\n');

```

Bibliographie

[Sophie Baillargeon, 2005] "Le krigeage : revue de la théorie et application à l'interpolation spatiale de données de précipitations"

[Malek Ben Salem, Safae Faraji, 2013] "Postraitemet d'un plan d'expérience de courbes caractéristiques de splines d'essuie-vitre"

[Isaaks, Edward H.,and Srivastava, R Mohan, 1989] "An introduction to applied geostatistics", chapitre 12, page 278 à 322

[Søren N. Lophaven Hans Bruun Nielsen Jacob Søndergaard, 2002] "DACE, A MATLAB Kriging Toolbox"