

Caractérisation de sources radar par des courbes de Bézier

Florian DIGNE^{1,2}, Cédric CORNU¹, Alexandre BAUSSARD², Ali KHENCHAF², Daniel JAHAN¹

¹Thales Systèmes Aéroportés, 10 avenue de la 1ère D.F.L., 29200 Brest, France

²ENSTA Bretagne / Lab-STICC (UMR CNRS 6285), 2 rue François Verny, 29806 Brest Cedex 9, France

{ florian.digne, cedric.cornu, daniel.jahan } @fr.thalesgroup.fr
{ alexandre.baussard, ali.khenchaf } @ensta-bretagne.fr

Résumé – Avec la démocratisation des radars de navigation, la discrimination des émetteurs dans un environnement électroniquement dense devient de plus en plus difficile. Les industriels du secteur de la défense sont donc confrontés à la problématique de trouver de nouvelles solutions afin de caractériser les émetteurs.

Cet article présente l'apport potentiel de l'utilisation des courbes de Bézier pour modéliser la dynamique de la loi de fréquence instantanée (LFI) d'une impulsion en vue d'une identification des émetteurs présents sur zone. Des exemples applicatifs sur des signaux réels enregistrés en rade de Brest sont présentés avec un taux de bonne classification de 100% en cas de caractérisation homogène et de 97% en cas de caractérisation hétérogène des courbes de Bézier.

Abstract – With the democratization of the navigation radars, the discrimination between transmitters in this denser environment has become more and more difficult. To solve this critical problem, defence industrialists have to find new ways to characterize any transmitters.

This article presents the potential brought by Bézier's curve to model the instantaneous frequency dynamics in order to identify all the transmitters present in the area. Applicative examples on real signals recorded in the Brest harbour are provided with a good classification rate of 100% in case of homogeneous classification and 97% in the heterogeneous case.

1 Introduction et Contexte

En guerre électronique navale, aérienne ou terrestre, il est primordial d'avoir une parfaite connaissance du terrain et notamment des acteurs présents sur site (figure 1). Avec la récente densification des émetteurs radars, en particulier dans le domaine naval, la discrimination des sources électromagnétiques devient de plus en plus problématique et de nouveaux paramètres caractéristiques doivent être trouvés afin de pouvoir assurer la différenciation des radars présents.

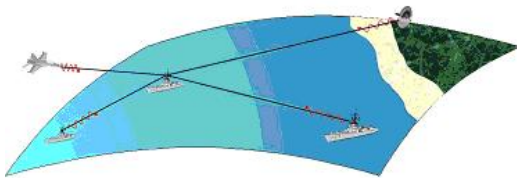


FIGURE 1 – Exemple de contexte de guerre électronique navale.

En plus de la solution hardware qui serait d'apporter plus de précision aux mesures des paramètres primaires déjà utilisés comme la largeur d'impulsion, la direction d'arrivée ou le niveau de l'impulsion, l'une des solutions est d'utiliser

des paramètres sous-exploités à l'heure actuelle comme la loi de fréquence instantanée (LFI). En effet, seule la fréquence moyenne d'une impulsion est actuellement utilisée en vue d'une discrimination. Les données comme l'excursion en fréquence qui pourtant pourraient caractériser les signaux de type chirp sont encore très peu utilisées dans les systèmes de guerre électronique alors que les radars à faible probabilité d'interception fonctionnent en modulation de fréquence (radars FMCW).

L'apport de la LFI au désentrelacement d'impulsions radar a fait l'objet d'une étude dans [1] pour le contexte de la guerre électronique. Afin d'utiliser ces LFI dans l'objectif d'une classification, celles-ci sont caractérisées au travers de courbes de Bézier. Une courbe de Bézier se caractérisant entièrement par un nombre fini de points, approcher une loi de fréquence instantanée par une courbe de Bézier permettra ainsi de définir des points caractéristiques de la LFI. Ces points peuvent être utilisés comme paramètres signaux de l'impulsion dans un algorithme de classification puis d'identification. Les courbes de Bézier ont des propriétés dont la mise à l'échelle qui permettent leur utilisation pour toutes les conditions d'enregistrement.

Des études sur la caractérisation et l'identification des fréquences ([2],[3]) ont été réalisées dans un contexte radar/guerre électronique. Ces études ne traitaient généralement que d'une partie de la chaîne de traitement (soit ca-

ractérisation soit identification) et peu d'applications étaient présentées sur des signaux réels.

Dans cet article nous proposons une chaîne de traitement complète allant de la caractérisation à la classification. Après avoir fait un bref résumé de l'estimation de la loi de fréquence instantanée, nous aborderons en détail la modélisation et la caractérisation fréquentielle par l'intermédiaire des points de Bézier. L'optimisation de cette modélisation se fera via l'utilisation de seuils dont les définitions seront également introduites. Après avoir décrit la méthode de classification utilisée, l'ensemble de l'algorithme sera appliqué à des signaux radar enregistrés en rade de Brest.

2 Estimation de la loi de fréquence instantanée

Il existe plusieurs façons pour mesurer la fréquence instantanée d'une impulsion radar. Hormis les méthodes matérielles, des méthodes comme les spectrogrammes, les transformées en ondelettes, les fonctions d'ambiguïté d'ordre supérieur sont souvent choisies pour décrire la fréquence d'une impulsion qu'elle soit issue d'un radar à impulsion ou d'une radar à faible probabilité d'interception. Une dérivée simple point à point de la phase peut également être envisagée.

Dans [1], il a été montré que la distribution de Wigner-Ville permettait d'approximer au mieux la loi ainsi que le taux de fréquence instantanée dans un contexte de guerre électronique. Cette approche est préférée à la fonction d'ambiguïté d'ordre supérieur ou à des méthodes dites basiques (dérivée point à point ou régression polynomiale). En réalisant sur une fenêtre glissante centrée sur $t = t_0$ une de ces analyses fréquentielles, on peut calculer la fréquence instantanée d'une impulsion à cet instant t_0 .

En supposant que les phases de signaux radar peuvent se modéliser sous la forme d'un polynôme, et que sur une fenêtre de temps assez courte elles peuvent être modélisées par un chirp, l'estimation de la loi de fréquence instantanée se fait à partir du moment $M(t)$ et de sa transformée de Fourier $\mathcal{M}(f)$ définis par [4] :

$$M(t, \tau) = s(t - \tau/2)s(t + \tau/2), \quad (1)$$

$$LFI(t) = \frac{1}{2} \max_f \mathcal{M}(t, f). \quad (2)$$

Sur les figures 2a et 2b, les lois de fréquence instantanée des impulsions présentes et celles d'un émetteur spécifique dans un enregistrement d'une durée de 2 secondes sont représentées. On pourra déjà remarquer que dans le cadre des radars à impulsions, ces lois sont loin d'être constantes, linéaires, ou quadratiques et sont visuellement dissociables en n'utilisant que ce paramètre.

Si, visuellement, le regroupement se fait instinctivement, une classification sur des éléments d'une taille importante

(à partir de 150 échantillons) mais également de largeur d'impulsion variable, est plus délicate à réaliser. L'application de la théorie des courbes de Bézier sur ces lois de fréquence instantanée va permettre d'avoir des vecteurs d'état à dimension fixe et faible.

3 Modélisation par les courbes de Bézier

3.1 Généralités sur les courbes de Bézier

Une courbe de Bézier \mathcal{C} de degré n se définit à partir de $n + 1$ points, appelés *points d'attraction* ou *points de Bézier*, notés P_i avec $i \in [0..n]$ telle que [5] :

$$\mathcal{C}(t) = \sum_{i=0}^n C_n^i t^i (1-t)^{n-i} P_i \quad (3)$$

$$= A_n(t)P, \quad t \in [0, 1], \quad (4)$$

où $A_n(t)$ est un vecteur tel que le i^{ime} élément est le i^{ime} polynôme de Bernstein de degré n à l'instant t : $A_n(t)_i = C_n^i (1-t)^{n-i} t^i$ et C_n^i le coefficient binomial. Par la suite on notera A_n la matrice telle que $\mathcal{C} = A_n P$.

On peut ainsi voir une courbe de Bézier comme une suite de barycentres dont les masses pour chaque point P_i seraient $C_n^i t^i (1-t)^{n-i}$.

Le but de cette étude est de trouver les points \hat{P}_i décrivant au mieux les lois de fréquence instantanée. Puisque les courbes de Bézier sont stables par changement d'échelle, les problèmes liés à la fréquence d'échantillonnage ou la fréquence de l'oscillateur local sont éliminés.

3.2 Modélisation

3.2.1 Résolution non-linéaire des moindres carrés

Trouver une courbe de Bézier décrivant au mieux les courbes $\mathcal{D} : \{t(\tau), LFI(t(\tau))\}, \tau \in [0, 1]$ des lois de fréquence instantanée est équivalent à résoudre un problème des moindres carrés non linéaire. Il s'agit en effet de calculer les points \hat{P}_i mais également les instants τ qui minimisent le résidu \mathcal{R} au sens de la norme de Frobenius :

$$\mathcal{R}(\tau) = \left\| A(\tau)\hat{P} - \mathcal{D}(\tau) \right\|_F. \quad (5)$$

La résolution de ce problème se fait en deux étapes. Dans un premier temps, la détermination des instants τ se fait par la méthode de Gauss-Newton en essayant de trouver les racines de \mathcal{R} . Soit τ_c l'estimation d'une des racines du résidu et $J(\tau_c)$ la matrice jacobienne de \mathcal{R} en $\tau = \tau_c$, la méthode de Gauss-Newton donne une nouvelle approximation de la racine donnée par :

$$\tau_c \approx \tau_c - (J^T(\tau_c)J(\tau_c))^{-1} J^T(\tau_c)\mathcal{R}(\tau_c). \quad (6)$$

Ensuite, pour tous les instants τ calculés, la solution \hat{P} minimisant l'équation s'obtient en utilisant la pseudo-inverse de Moore-Penrose A^+ de la matrice A .

$$\hat{P} = A^+(\tau)\mathcal{D}(\tau). \quad (7)$$

En réalisant ces deux étapes jusqu'à atteindre un critère d'arrêt désiré, la loi de fréquence instantanée peut être correctement décrite par une courbe de Bézier.

Dans le cadre de courbes non-paramétriques comme la LFI, le choix des instants τ_c initiaux est cruciale. Pour cela, comme préconisé dans [6], la méthode d'invariance affine prenant en considération la dérivée seconde de la courbe est utilisée.

Une application de l'algorithme de modélisation décrit précédemment sur les LFI de la figure 2b donne les résultats figurant sur la figure 2c avec pour un degré $n = 3$. Un taux de bonne de classification de 100% est obtenu.

3.2.2 Détermination du critère d'arrêt

La définition d'un critère d'arrêt pour l'algorithme de résolution est nécessaire. Ce critère d'arrêt ϵ_n^k peut se faire sur le taux d'amélioration entre les itérations k et $k + 1$ à partir de la norme de Frobenius entre la loi de fréquence instantanée et la courbe de Bézier s'en approchant :

$$\epsilon_n^k = \frac{\|A_n^k P_n^k - \mathcal{D}\|_F}{\|A_{n-1}^k P_{n-1}^k - \mathcal{D}\|_F} \quad (8)$$

Dès lors que le taux d'amélioration est en dessous d'un seuil S_{cout} , on peut considérer que les points de Bézier estimés n'évolueront plus.

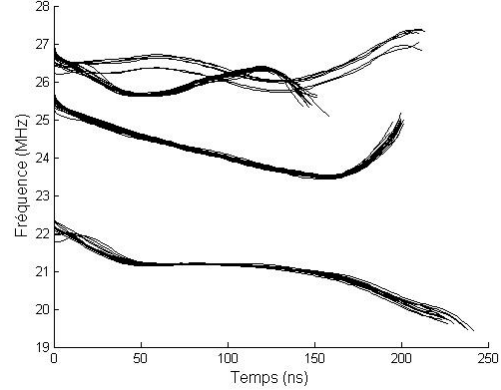
Dans un domaine critique comme la guerre électronique où l'information doit être la plus instantanée possible, un critère d'arrêt trop faible sera handicapant car la courbe de Bézier peut ne pas être représentative de la loi de fréquence. De même qu'un critère d'arrêt trop grand nuira au système et la convergence peut ne pas être assurée.

D'après la figure 3, les points convergent en une vingtaine d'itérations à un taux d'amélioration en dessous de 10^{-2} . Le nombre d'itérations pour atteindre un critère d'arrêt de 10^{-3} est deux fois plus grand et n'est pas nécessaire au vu du résidu atteint pour ce critère d'arrêt.

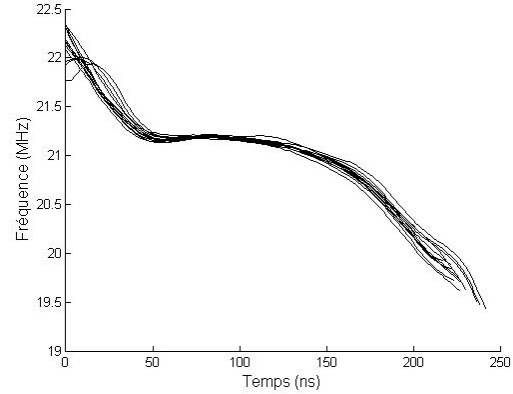
3.3 Détermination d'un degré optimal

Une étape de détermination d'un degré optimal afin de mieux caractériser les impulsions peut être envisagée pour le traitement des données. Le principal problème de la détermination d'un degré optimal est qu'entre deux impulsions radars, la représentation par des courbes de Bézier de la loi de fréquence instantanée peut varier et peut notamment dépendre de l'estimation de la date d'arrivée de l'impulsion et de la largeur d'impulsion.

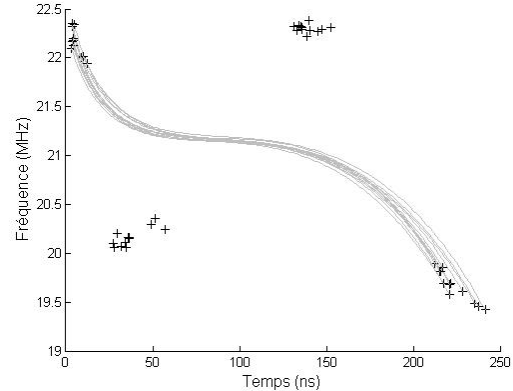
Si des algorithmes de réduction de degré des courbes de Bézier existent en conception graphique [7], leur application dans ce contexte reste compliquée et déconseillée car



(a) Lois de fréquence instantanée de plusieurs émetteurs.



(b) Lois de fréquence instantanée d'un émetteur spécifique.



(c) Courbes et points de Bézier d'un émetteur spécifique obtenus après modélisation.

FIGURE 2 – Application de la modélisation de lois de fréquences instantanées par des courbes de Bézier de degré $n = 3$.

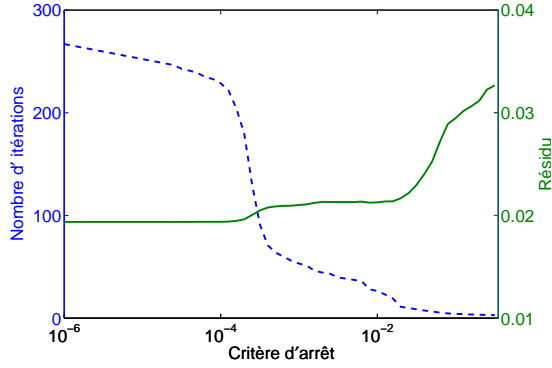


FIGURE 3 – Nombre d’itérations nécessaire pour le critère d’arrêt. La courbe en pointillés représente le nombre d’itérations, la courbe continue le résidu atteint pour un critère d’arrêt donné.

une limitation dans le degré des courbes de Bézier est nécessaire afin de ne pas tester trop de cas possible.

La détermination du degré optimal peut se faire à partir de deux paramètres : l’erreur quadratique moyenne entre la loi de fréquence instantanée et la courbe de Bézier la modélisant au mieux, mais également l’erreur quadratique point à point.

En utilisant le premier paramètre et après avoir déterminé un seuil S_{EQM} propre à la normalisation, on pourra définir si la loi de fréquence instantanée est correctement estimée.

On peut aussi considérer l’arrêt de l’algorithme dès lors que l’évolution entre deux degrés successifs n’est pas assez significative.

L’utilisation du deuxième paramètre (erreur quadratique point à point) permet d’estomper les erreurs de détection ou les phénomènes de propagation en étudiant la distribution des erreurs quadratiques et en considérant qu’on a une bonne estimation dès lors qu’on a une fraction f inférieure à un second seuil S_{EQ} .

En considérant ses hypothèses sur l’erreur quadratique, on définit le degré optimal comme étant l’entier le plus petit vérifiant ces deux conditions.

4 Classification sur des signaux radars réels

4.1 Contexte

Dans le cadre de l’étude des signaux radars ont été enregistrés en rade de Brest. Les signaux ont été enregistrés dans la bande de radars de navigation entre 9.1 et 9.5 GHz dans une bande de largeur 200MHz et une fréquence d’échantillonnage de 600MHz.

Pour des raisons de lisibilité, les signaux représentés sont les signaux des émetteurs présents dans une bande de fréquence plus restreinte et dont la largeur d’impulsion est

inférieure à 200ns.

4.2 Classification avec un degré fixe

L’application d’un algorithme de classification densimétrique de type DBSCAN (*Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise*) [8], pour des vecteurs d’états contenant les 4 points de Bézier (soit 8 variables), permet de séparer et d’identifier les émetteurs. Cet algorithme non supervisé ne nécessite que les résolutions fréquentielle et temporelle (capacités de différenciation) désirées par l’utilisateur en entrée.

Après identification des classes à partir des points de Bézier de la figure 2c, nous obtenons les résultats des figures 4a, 4b et 4c.

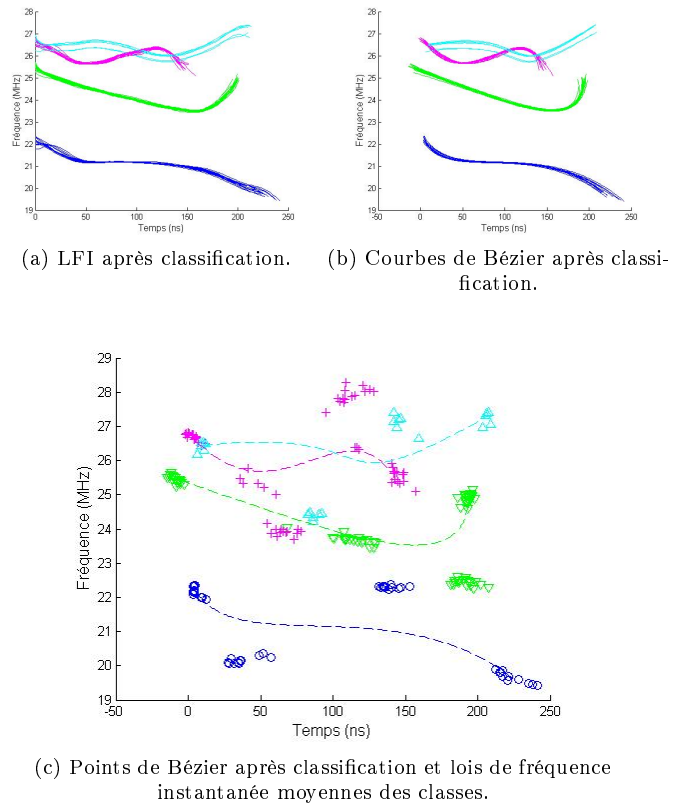


FIGURE 4 – Classification de lois de fréquence instantanée à partir de points de Bézier avec un degré fixe. Chaque émetteur trouvé est représenté par une couleur spécifique.

L’utilisation d’un vecteur d’état n’ayant que des points de Bézier permet une séparation en classes pertinente des 212 lois de fréquence instantanée mesurées et ainsi de faire un désentrelacement sans utiliser les paramètres primaires utilisés actuellement dans les systèmes de guerre électronique. Alors que les capacités de différenciation des systèmes actuels n’aurait pas permis de différencier les courbes dont les fréquences oscillent autour de 26MHz (après passage dans un mélangeur), l’algorithme proposé dans cette

étude permet dorénavant d'améliorer le pouvoir de différenciation fréquentielle.

Pour un nombre de points fixe, une modélisation par des courbes de degré $n = 3$ semble donner les résultats les plus cohérents tant en terme de modélisation que de classification des émetteurs puisqu'un taux de bonne classification de 100% est atteint.

4.3 Classification avec un degré optimal

La classification des mêmes impulsions avec un degré optimal donne des résultats assez semblables (figure 5a). En définissant le degré optimal à partir des paramètres précédents (figure 5b), seules 6 impulsions sur les 212 ne sont pas classifiées (2.8%) et sont considérées comme des impulsions aberrantes. Le taux de bonne classification atteint ainsi 97.2%.

L'estimation d'un degré "optimal" ajoute une variable supplémentaire dans le schéma de classification et, par conséquent, entraîne une légère dégradation du taux de bonne classification à cause d'une mauvaise estimation du degré de certaines impulsions. Ces impulsions "aberrantes" proviennent d'une mauvaise estimation du début de l'impulsion et de la fin de l'impulsion en cas de faible rapport signal à bruit. Les points de Bézier ne sont donc plus caractéristiques de l'intégralité de l'impulsion et sont rejetés par l'algorithme de classification densimétrique.

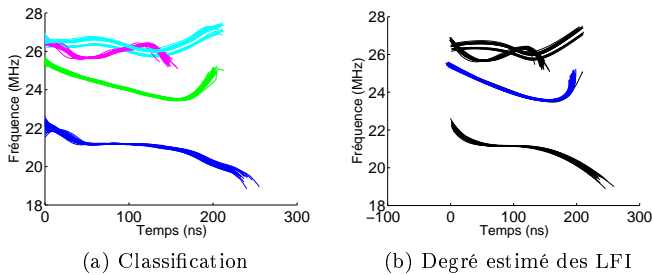


FIGURE 5 – Classification de lois de fréquence instantanée à partir de points de Bézier avec calcul d'un degré optimal. Les courbes de Bézier de degré 2 sont représentées en bleu sur la figure (b), les courbes de degré 3 en noir.

4.4 Discussion

Choisir entre un degré fixe et un degré optimal de la courbe est le principal problème de la méthode décrite ici. Fixer un degré reviendra à optimiser l'étape de classification, considérer un degré optimal reviendra à optimiser l'étape de caractérisation. La définition de ce degré idéal pourrait également prendre d'autres paramètres en compte.

Cette étude sur le choix du degré des courbes de Bézier devra être poursuivie en considérant notamment un nombre plus grand de classes de signaux afin de vérifier l'apport réel de l'estimation du degré optimal.

Notons que dans un contexte comme la guerre électronique, la classification ne se fera pas que sur ces paramètres et utilisera notamment des paramètres dits secondaires comme la période d'antenne ou l'intervalle de répétition des impulsions, c'est pourquoi utiliser un degré optimal peut être envisagé dans les futurs systèmes.

5 Conclusion

L'application du modèle des courbes de Bézier et l'utilisation des points de Bézier caractéristiques dans un algorithme de classification densimétrique permettent de caractériser parfaitement la dynamique des lois de fréquence instantanée et de séparer correctement les différentes sources électromagnétiques, sans utiliser les paramètres primaires ou secondaires, utilisés actuellement dans les systèmes de guerre électronique.

Les exemples donnés sur des signaux réels enregistrés dans le cadre de l'étude apportent également une meilleure résolution par rapport aux systèmes de guerre électronique actuels.

Une prochaine étape incorporera une étude plus détaillée de la variabilité de la loi de fréquence instantanée avec le temps et les conditions environnementales à l'issue de laquelle une classification sera réalisée, l'application finale étant la recherche d'émetteurs spécifiques en utilisant des enregistrements espacés dans le temps.

Références

- [1] F. Digne, C. Cornu, A. Baussard, A. Khenchaf, and D. Jahan. Use of short-term polynomial phase estimation for new electronic warfare systems. *IET International Radar Conference (Radar'12)*, Glasgow, 2012.
- [2] C. Brolly. *Nouveaux Concepts en Extraction Passive de Radars*. PhD thesis, Université de Nice-Sophia-Antipolis, 1998.
- [3] M.L. Farquharson. *Estimating the parameters of polynomial phase signals*. PhD thesis, Queensland University of Technology, Brisbane, Australia, 2006.
- [4] S. Peleg and B. Porat. Estimation and classification of polynomial-phase signals. *IEEE Transactions on Information Theory*, 37(2) :422–430, 1991.
- [5] G. Demengel and J.P. Pouget. *Modèles de Bézier, des b-splines et des nurbs : outils pour l'ingénieur, bases pour la CAO : mathématiques des courbes et des surfaces*. Ellipses, 1998.
- [6] T.A. Pastva. Bezier curve fitting. Technical report, DTIC Document, 1998.
- [7] Mark A Watkins and Andrew J Worsey. Degree reduction of bezier curves. *Computer-aided design*, 20(7) :398–405, 1988.
- [8] M. Ester, H.P. Kriegel, J. Sander, and X. Xu. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Knowledge Discovery and Data mining*, volume 1996, pages 226–231. AAAI Press, 1996.