

CONTOURS ACTIFS GEODESIQUES ET A MODELES CONTRAINTS POUR LE SUIVI DES ORAGES DANS UN CONTEXTE MULTISENSEUR : RADAR, INTERFEROMETRE VHF, SATELLITE IR

F. Barbaresco, S. Bonney, J. Lambert, B. Monnier

THOMSON-CSF AIRSYS

Développement Radar/Algorithmes et Nouveaux Concepts (RD/RAN)

7/9, rue des Mathurins, 92223 Bagneux Cedex, FRANCE

E-mail : monnier@airsys.thomson.fr

E-mail : barbaresco@airsys.thomson.fr

Résumé

Nous décrivons dans cet article une nouvelle méthode de suivi dynamique des orages à partir de données multisenseurs. La prédiction à court terme d'évolution des phénomènes atmosphériques en position et en forme est assurée par une méthode de contour actif à modèle contraint (modèle affine complet) qui permet d'identifier les paramètres de déformation. Les changements de topologie des phénomènes atmosphériques sont gérés par la mise en œuvre d'une technique de front de propagation ou contour actif géodésique. L'objectif de cette nouvelle fonctionnalité est double : optimisation dynamique de la gestion radar dans un cadre militaire et gestion optimale des flux aériens dans un cadre civil.

Abstract

The aim of this study is to perform a short term nowcasting of thunderstorm evolution (shape and position). Motion-based segmentation of atmospheric phenomenon allows to detect the dynamic ones. These dynamic thunderstorms can be tracked by means of adapted algorithms based on new techniques such as front propagation combined with model-constrained active contour for deformation prediction and topological change adaptation. The efficiency of our methods will be demonstrated on multisensor atmospheric images : radar, VHF interferometer and optical images. This application has two objectives : dynamic military radar management and civil traffic regulation according to atmospheric phenomenon.

I. INTRODUCTION

THOMSON-CSF AIRSYS a adapté des algorithmes de suivi dynamique de modèles déformables qu'elle avait précédemment implantés [11,12] pour les rendre utilisables pour le suivi dynamique des orages dans un contexte multisenseur (radars ASR ou radars météorologiques, interféromètre VHF du type SAFIR, satellites Infra-Rouge), dans le cadre d'une étude européenne du 4ème programme cadre de recherche : 4MIDaBLE (4-D Meteorological Information Databases Linked across Europe). Le suivi dynamique des orages a pour but d'aider les centres de contrôle du trafic aérien ou les tours de contrôle sur les aéroports pour optimiser le trafic en vol et les flux au sol sur l'aéroport en tenant compte de l'évolution des phénomènes atmosphériques sévères (orages, turbulences, grêle, givre, éclairs, ...). Pour ce faire, nous disposons de plusieurs senseurs nous fournissant des informations sur l'état de l'atmosphère : radar (précipitation, turbulences par le doppler, classification des hydrométéors par la polarisation, le champ de vitesse du vent et le modèle de déformation du nuage par traitement d'image, ...), interféromètre VHF (les densités d'éclairs inter-nuages et nuage-sol, ...), le satellite IR (la hauteur du sommet du nuage, l'ombre portée au sol, la forme des nébulosités pour identifier le type de nuage, ...). Les premières études basées sur les contours actifs à modèle ballon, développées par L. Cohen [3], associée à un pistage du modèle de déformation (filtrage de Kalman) ou l'approche par modèles hiérarchiques [12] ont été abandonnées car elles ne résolvent pas le problème majeur du changement de topologie (séparation de nuages en plusieurs morceaux, fusion de nuages, ...). Pour résoudre ce problème, nous avons utilisé la technique des contours actifs géodésiques étudiée au CEREMADE [7,8] et les fronts de propagation étudiés par Sethian [4,5,6] aux Etats Unis.

Le problème de changement de topologie étant résolu, le problème de suivi, proprement dit, s'inspire des travaux de B. Bascle [10] et utilise les contours actifs à modèles contraints.

II. CONTOURS ACTIFS GEODESIQUES

L'approche classique des contours actifs consiste à initialiser un contour par une courbe fermée que l'on déforme ensuite en minimisant une fonctionnelle. Soit $C(q)$ une courbe plane paramétrée et I l'image sur laquelle on souhaite effectuer la détection de contour, on associe à la courbe une énergie définie par :

$$E(C) = \int_0^1 \alpha |C'|^2 + \beta |C''|^2 .dq - \lambda \int_0^1 |\nabla I(C)| .dq \quad (1)$$

Les deux premiers termes sont des termes de régularisation en élongation et en torsion (énergie interne du contour) alors que le dernier terme traduit l'attache aux données et définit une force d'attraction du contour déduite du gradient de l'image. On peut également ajouter une force d'expansion suivant un modèle ballon, développé par Cohen [3] et que nous avons utilisé dans [12], pour être moins sensible à l'initialisation. On résout le problème de détection de contours en cherchant C qui minimise E par différentes méthodes (éléments ou différences finies [3] ou programmation dynamique [12]). Il apparaît que cette approche de type Euler-Lagrangienne ne permet pas les changements de topologie de la courbe C .

Ce problème est résolu dans l'approche que Caselles [7,8] et Sethian [4,5,6] ont proposé conjointement : contours actifs géodésiques ou front de propagation. Dans cette approche, on montre que la solution du problème s'obtient comme la courbe de niveau zéro d'une surface 3D. La courbe évolue en fonction d'un terme conditionnant la vitesse d'évolution du contours à partir d'une mesure faite sur l'image. Caselles [7] montre que cette approche est une extension de l'approche par contour actif classique. Si on annule le second terme de la régularisa-

tion dans (1) et si on remplace le détecteur de contour $|\nabla I|$ par une fonction

plus générale dépendant du gradient de I , $g(|\nabla I|)^2$ alors la fonction d'énergie devient

$$E(C) = \alpha \int_0^1 |C'(q)|^2 dq + \lambda \int_0^1 g(|\nabla I(C(q))|)^2 dq \quad (2)$$

Il apparaît alors que l'énergie du contour actif est donnée par une géodésique dans l'espace de Riemann déduit implicitement de l'image.

En utilisant le principe de Maupertuis, on montre que l'on se ramène au problème :

$$\text{MIN}_{\substack{C=(C_1, C_2) \\ H=E_0}} \left[\alpha \int_0^1 |C'(q)|^2 dq + \lambda \int_0^1 g(|\nabla I(C(q))|)^2 dq \right]$$

qui est équivalent à :

$$\text{MIN}_C \int_0^1 g(|\nabla I(C(q))|) |C'(q)| dq \quad (3)$$

Qui est un problème de calcul de géodésique dans l'espace de Riemann défini par une métrique dépendant du gradient de l'image :

$$L_R = \int_0^1 g(|\nabla I(C(q))|) ds \quad (4)$$

On montre [7] que la résolution du calcul de géodésique est donnée, pour résoudre les problèmes de changement de topologie, par la détermination de la courbe de niveau zéro de la surface Ψ ($\Psi(0, C) = \Psi_0(C)$)

, évoluant suivant l'équation suivante :

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} = |\nabla \Psi| \cdot \text{div} \left(g(I) \frac{\nabla \Psi}{|\nabla \Psi|} \right) = g(I) |\nabla \Psi| \cdot K + \nabla g \cdot \nabla \Psi \quad (5)$$

L'autre approche développée par Sethian [4], consiste à considérer un front de propagation comme une ligne de niveau d'une fonction Ψ . Soit $X=(x, y)$ le vecteur des coordonnées d'un point du front en fonction du temps, alors le front est donné par : $\Psi(x(t), y(t), t) = 0$

d'où l'on déduit : $\Psi_t + \nabla \Psi \cdot X_t = 0$ or $X_t = F \cdot N$ et $N = \frac{\nabla \Psi}{|\nabla \Psi|}$

Dans le cas général, la surface Ψ est donnée par : $\Psi_t + F |\nabla \Psi| = 0$

Si on prend : $F(K) = F_0 + F_1(K) = 1 + \epsilon \cdot K$ avec K la courbure.

F_0 constitue la force d'advection, équivalente à la force ballon et F_1 la force de régularisation. Si F ne dépend pas de I , le front se propagera avec une vitesse proportionnelle à sa courbure. Pour l'application détection de contour, il faut que la vitesse d'évolution dépende du gradient de l'image. La surface est alors définie par : $\Psi_t + \hat{k}_1(F_0 + F_1) |\nabla \Psi| = 0$

avec comme terme d'attache aux données en fonction du gradient de l'image : $k_1(x, y) = \frac{1}{1 + |\nabla G_\sigma * I(x, y)|}$ ou $k_1(x, y) = e^{-|\nabla G_\sigma * I(x, y)|}$

Le critère, ainsi défini, est étendu pour toutes les lignes de niveaux : $\hat{k}_1(x, y) = \{k_1(x', y') / (x', y') \in \text{front}, \text{ le plus proche de } (x, y)\}$

Pour trouver une solution discrète du problème satisfaisante, on utilise une discrétisation par différences finies. Pour cela, on utilise l'approche de Sethian [4] :

Repartons de l'équation d'évolution avec $F(K)=1$. Dans le cas monodimensionnel, on en déduit :

$$u_t + [H(u)]_x = 0 \text{ avec } H(u) = (u^2)^{1/2} \text{ et } u = \Psi_x \quad (6)$$

C'est une loi de conservation hyperbolique. Nous allons raisonner à partir d'une version intégrale de (6) qui admet des solutions discontinues. Considérons un intervalle $[a, b]$ et intégrons (6) :

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_a^b u(x, t) dx = H[u(a, t)] - H[u(b, t)]$$

u sera une solution faible du problème si elle satisfait l'équation intégrale-différentielle précédente.

Comment être sûr qu'un algorithme numérique approche la solution qui réponde justement à la condition d'entropie ?

Définition : Soit u_i^n la valeur de u en $i\Delta x$ et $n\Delta t$. Un modèle « de différence sur trois points » est « conservatif » s'il existe une fonction g telle que le modèle puisse s'écrire sous la forme :

$$\frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t} = - \frac{g(u_i^n, u_{i+1}^n) - g(u_{i-1}^n, u_i^n)}{\Delta x} \text{ avec } g(u, u) = H(u)$$

Cette définition semble naturelle puisqu'elle approxime bien la loi de conservation hyperbolique. De ce fait, tout modèle qui peut se mettre sous une forme « conservative » est une solution faible du problème. Mais comment garantir le fait que la solution trouvée vérifie la condition d'entropie ? Pour cela, on doit restreindre l'espace des solutions en ajoutant un critère de monotonie. On dit qu'un modèle du type $u_i^{n+1} = F(u_{i-1}^n, u_i^n, u_{i+1}^n)$ est monotone si on impose à F d'être une fonction croissante des arguments $u_{i-1}^n, u_i^n, u_{i+1}^n$. La conclusion est triviale : tout modèle conservatif monotone est une solution qui vérifie la condition d'entropie.

Il faut désormais revenir au problème initial. Comment convertir le modèle trouvé pour la fonction u en un schéma qui soit correct pour la fonction Ψ ? Ecrivons de nouveau l'équation d'évolution de Ψ avec une discrétisation par différences finies pour la dérivée temporelle :

$$\Psi_i^{n+1} = \Psi_i^n - \Delta t H(u)$$

Puisque g est une fonction qui approxime $H(u)$, l'équation devient

$$\begin{aligned} \Psi_i^{n+1} &= \Psi_i^n - \Delta t \text{tg}(u_{i-1/2}^n, u_{i+1/2}^n) \\ &\approx \Psi_i^n - \Delta t \text{tg} \left(\frac{\Psi_i^n - \Psi_{i-1}^n}{\Delta x}, \frac{\Psi_{i+1}^n - \Psi_i^n}{\Delta x} \right) \end{aligned}$$

Soit : $\Psi_i^{n+1} = \Psi_i^n - \Delta t \text{tg}(D_x^- \Psi_i, D_x^+ \Psi_i)$

D^- et D^+ sont les opérateurs classiques de différences finies à gauche et à droite. Soit :

$$D_x^- \Psi_i = \frac{\Psi_i^n - \Psi_{i-1}^n}{\Delta x} \text{ et } D_x^+ \Psi_i = \frac{\Psi_{i+1}^n - \Psi_i^n}{\Delta x}$$

Puisque $H(u)$ est une fonction de u^2 ($H(u) = f(u^2)$), il a été démontré [4] que l'on pouvait choisir g de la forme :

$$g(u_{i-1/2}, u_{i+1/2}) = f \left(\left(\max(D_x^- \Psi, 0) \right)^2 + \left(\min(D_x^+ \Psi, 0) \right)^2 \right)^{1/2}$$

Dans notre cas $f(u^2) = -(u^2)^{1/2}$, on peut écrire :

$$\Psi_i^{n+1} = \Psi_i^n - \Delta t \left(\left(\max(D_x^- \Psi, 0) \right)^2 + \left(\min(D_x^+ \Psi, 0) \right)^2 \right)^{1/2}$$

Cette approximation produit une solution faible satisfaisant la condition d'entropie pour le problème de propagation de front.

. Résolution numérique

Précédemment, nous avons résolu le problème de l'approximation du terme d'advection $F_0 |\nabla \Psi|$ dans le cas monodimensionnel. Dans le cas bidimensionnel, on peut facilement étendre les résultats trouvés précédents :

$$F_0 |\nabla \Psi_{ij}| = F_0 \left(\left(\max(D_x^- \Psi_{ij}, 0) \right)^2 + \left(\min(D_x^+ \Psi_{ij}, 0) \right)^2 + \left(\max(D_y^- \Psi_{ij}, 0) \right)^2 + \left(\min(D_y^+ \Psi_{ij}, 0) \right)^2 \right)^{1/2}$$

Finalement l'équation d'évolution peut s'écrire :

$$\begin{aligned} \Psi_{ij}^{n+1} &= \Psi_{ij}^n - \Delta t F_0 \left(\left(\max(D_x^- \Psi_{ij}, 0) \right)^2 + \left(\min(D_x^+ \Psi_{ij}, 0) \right)^2 \right. \\ &\quad \left. + \left(\max(D_y^- \Psi_{ij}, 0) \right)^2 + \left(\min(D_y^+ \Psi_{ij}, 0) \right)^2 \right)^{1/2} - \Delta t F_1(K_{ij}) |\nabla \Psi_{ij}| \end{aligned}$$

Le terme régularisant $F_1 |\nabla \Psi|$ est approché par différences finies centrées et la courbure est donnée par :

$$K = \nabla \cdot \frac{\nabla \Psi}{|\nabla \Psi|} = \frac{\Psi_{xx} \Psi_y^2 - 2 \Psi_x \Psi_{xy} + \Psi_{yy} \Psi_x^2}{(\Psi_x^2 + \Psi_y^2)^{3/2}}$$

Dans les cas où $|\nabla \Psi| = 0$, on effectue des divisions par zéro. dans la courbure. Pour résoudre ce problème, on considère, autour des points critiques, la moyenne des valeurs de $F_1 |\nabla \Psi|$ de leurs huit voisins.

La courbe Ψ est construite, par de la distance de Chamfrein, comme étant la distance signée au front. Ce calcul est lourd. Pour le simplifier, Sethian [4] a proposé une méthode restreignant le calcul à une bande. Ainsi, le front évolue dans cette bande et la fonction Ψ n'est recalculée que lorsque le front sort de la bande. Ce qui permet également d'approximer le terme d'attache aux données en utilisant directement la valeur du gradient en (x,y) pour un point sur la surface $\Psi(x,y)$:

$$\hat{k}_1(x,y) = k_1(x,y)$$

Le front est obtenu par interpolation bilinéaire comme étant le niveau zéro de la surface Ψ . On définit un critère d'arrêt du front lié au test de stabilité de ce dernier :

$$E = \frac{\sum_{|\Psi_{ij}| < \alpha} |\Psi_{ij}^{n+1} - \Psi_{ij}^n|}{M} < \Delta t \Delta x \Delta y$$

avec M , le nombre de points en lesquels $|\Psi_{ij}^n| < \alpha$.

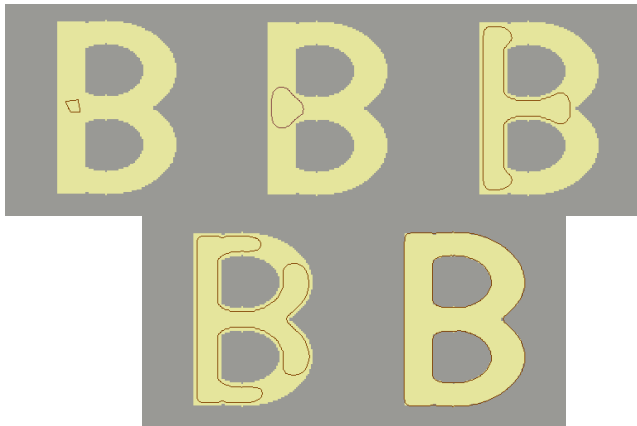


Fig. 1 : Résultats d'évolution d'un contour actif géodésique initialisé à l'intérieur d'une forme

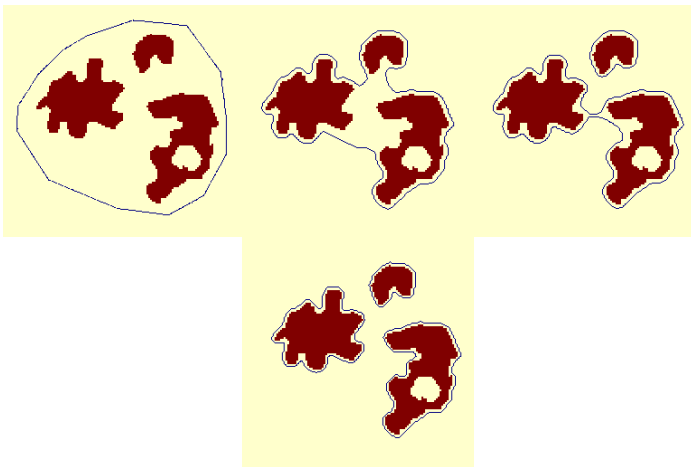


Fig. 2 : Résultats d'évolution d'un contour actif géodésique initialisé à l'extérieur d'une forme

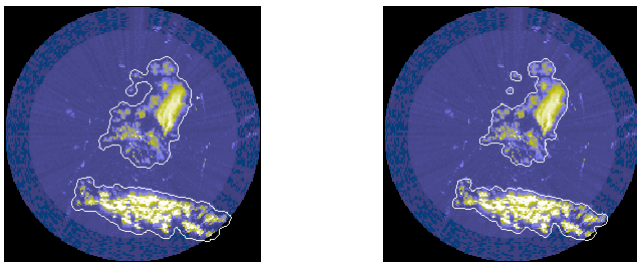


Fig. 3 : Exemple de changement de topologie sur données réelles (image fouillis radar)

III. SUIVI DE LA DEFORMATION

Les contours actifs et contours actifs géodésiques sont utilisés pour détecter les contours sur une image fixe. Dans le cas d'une séquence d'image, les méthodes de contours actifs suivent le contour si celui-ci possède un mouvement faible. Pour résoudre notre problème de suivi d'orage, où les données sont rafraichies toutes les 5 ou 15 minutes, et où le déplacement peut être important entre deux images, nous avons utilisé l'approche de B. Bascle dans [10] qui utilise les contours actifs à mouvement contraint, en initialisant, pour notre part, les contours des objets en mouvement par la segmentation spatio-temporelle multi-échelle par champs markovien [1,12]. Afin d'identifier la déformation globale du contour entre deux images et pouvoir faire de la prédiction, on contraint le contour actif en fonction du modèle de mouvement choisi (modèle affine complet pour notre application), au lieu de laisser celui-ci se déformer librement. Ainsi, au lieu de chercher à optimiser la forme de la courbe, on optimise les paramètres du mouvement. Les paramètres de mouvement sont estimés en deux étapes : une première étape de calcul des paramètres de translation puis dans une seconde étape les paramètres du modèle affine complet. La déformation étant estimée, on relâche la contrainte du modèle et on laisse le contour évoluer dans sa version « géodésique », pour une adaptation locale du contour au contenu de l'image, et une gestion des changements de topologie :

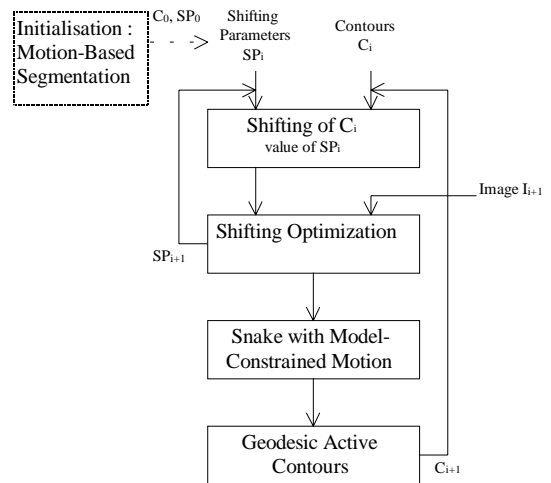


Fig. 4 : Algorithme de suivi dynamique par contour actif géodésique et à modèle contraint

On modélise alors l'énergie du contour actif comme la moyenne du gradient de l'intensité le long de la courbe :

$$E = -\frac{1}{|C|_c} \int |\nabla I(x(s), y(s))| ds$$

On essaie de déformer ce contour suivant un modèle de déformation paramétré, ici le modèle affine :

$$d(x, y) = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_g \\ y - y_g \end{bmatrix}$$

On considère le système sans masse et on associe à chaque paramètre un facteur d'amortissement :

$$\gamma_p \cdot \frac{dp}{dt} + \frac{\partial E}{\partial p} = 0$$

Cette équation se développe en :

$$\gamma_p \cdot \frac{dp}{dt} + \frac{1}{|C|_c} \int \left[\frac{\partial |\nabla I|}{\partial x} \left(\frac{\partial x}{\partial p} \right) + \frac{\partial |\nabla I|}{\partial y} \left(\frac{\partial y}{\partial p} \right) \right] ds = 0$$

On optimise en premier lieu les paramètres de la translation puis les paramètres du modèle affine. Les contraintes sont ensuite relâchées afin que le contour actif géodésique retrouve la forme de l'objet.

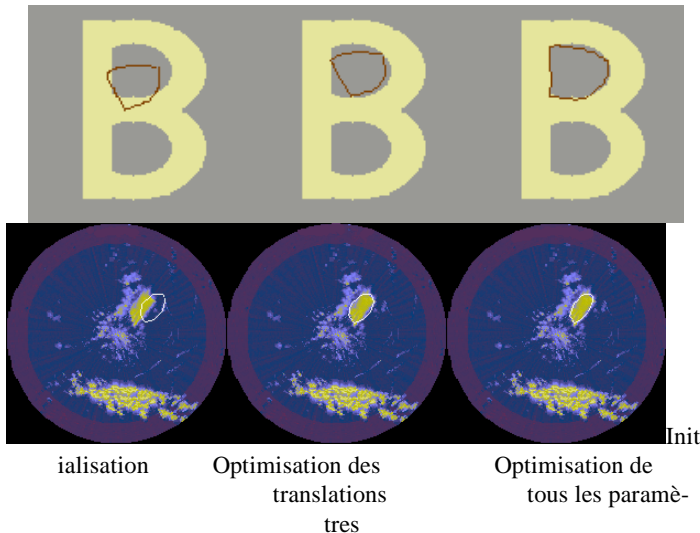


Fig. 5 : Illustration du contour actif à modèle contraint (modèle affine complet) sur données synthétiques et réelles radar

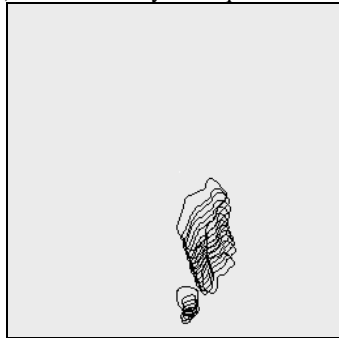


Fig. 6 : Illustration du suivi d'un orage

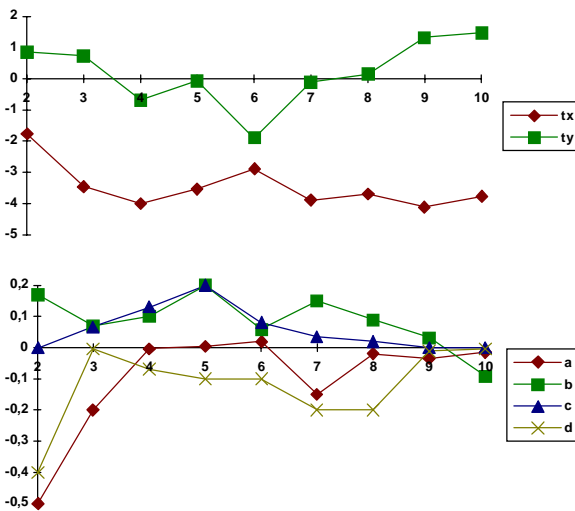


Fig. 7 : Evolution des paramètres t_x , t_y , a, b, c, d du modèle affine issu du contour actif à modèle contraint pour le suivi de l'orage

IV. SUIVI MULTISENSEUR

Dans l'approche multisenseur pour le suivi d'orage, le pistage de la déformation est effectué pour chaque senseur. Les pistes sont associées ensuite par une association de type piste à piste (track-to-track). Les formes localisées sur chaque senseur permettent de calculer des paramètres globaux (taux d'éclairs, type d'hydrométéors, turbulences, hauteur du nuage, champ de vent, ...) permettant de reconnaître les potentialités de danger associé à l'orage et sa phase d'évolution (initialisation, croissance, maturité, décroissance ou mort). Les modèles de déformation et des modèles empiriques permettront de pre-

voir l'évolution de l'orage à court terme et donc de renseigner les systèmes de gestion des flux aériens et aéroportuaires.

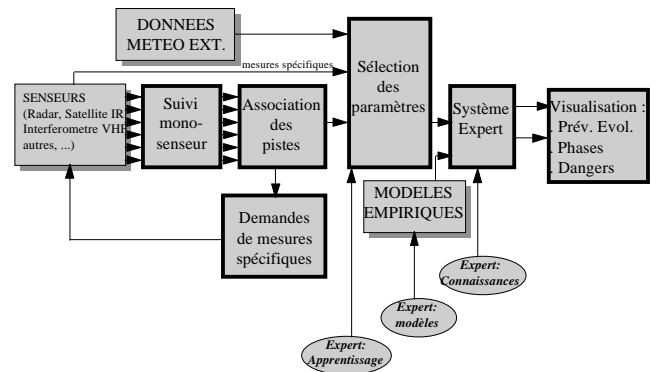


Fig. 8 : Suivi et caractérisation multisenseur des orages

Dans les cadres civil et militaire des systèmes futurs de contrôle aérien, il sera nécessaire de disposer d'une nouvelle fonctionnalité permettant le suivi et la prédiction de phénomènes atmosphériques à court terme (de 5 mn à 1 heure), localisés dans l'espace, nécessitant un pas d'analyse de l'ordre du kilomètre. Les services météorologiques nationaux ne répondent pas à ces nouveaux besoins, car leur système est basé sur un modèle numérique mondial possédant un maillage (quelques dizaines de kilomètres) adapté aux phénomènes de grande échelle (dépressions, cyclones, front de pluie, ...) et optimisé pour des prédictions à moyen et long terme (de 1 heure à 3 jours). Il nous est apparu, dans ce contexte, que les techniques de suivi de modèles déformables développées en traitement d'image pouvait résoudre de manière efficace ce problème nouvelle.

V. BIBLIOGRAPHIE

[1] HEITZ F., PEREZ P., « Une approche multiéchelle à l'analyse d'images par champs markoviens », INRIA, Rapport de recherche n.1477, Jul.1991.
 [2] BONNAUD L., LABIT C., « Etude d'algorithmes de suivi temporel de segmentation basée mouvement pour la compression de séquences d'images », INRIA, Rapport de recherche n.2253, Jan.1994.
 [3] COHEN L., « On active contours models », INRIA, Rapport de recherche n.1075, 1989.
 [4] MALADI R., SETHIAN J., VERMURI B., « Shape modeling with front propagation : a level set approach », IEEE Trans. on PAMI, vol.17, n.2, Feb.1995.
 [5] J.A. SETHIAN. « A fast marching level set method for monotonically advancing fronts », Proc. Nat. Acad. Sci., 93(4), 1996.
 [6] R. MALLADI and J.A. SETHIAN, «Level Set and Fast Marching Methods in Image Processing and Computer Vision», IEEE ICIP-96 Proc., pp. 489-492, Sept. 1996.
 [7] V. CASELLES, F. CATTE, T. COLL, F. DIBOS, « a Geometric Model for Active Contours », Numerische Mathematik 66, 1993
 [8] V. CASELLES, F. CATTE, T. COLL, F. DIBOS, «A geometric model for active contours in image processing», Rapport interne n°9210, CEREMADE, université Paris-Dauphine
 [9] G. SAPIRO, «From Active Contours to Anisotropic Diffusion : Connections between Basic PDE's in Image Processing», IEEE ICIP-96 Proc., pp. 477-480, Sept. 1996.
 [10] B. BASCLE, «Contributions et applications des modèles déformables en vision par ordinateur», thèse de Doctorat de l'université de Sophia-Antipolis, Juillet 1994
 [11] BARBARESCO F., BONNEY S., LAMBERT J., MONNIER B., « Motion-based segmentation and tracking of dynamic radar clutters », IEEE ICIP-96 Proc., vol. 3, pp 923-926, Sept. 1996.
 [12] BARBARESCO F., HERBOUX C., LAMBERT J., « Segmentation spatio-temporelle et suivi dynamique des fouillis radar », Journée SEE, et Traitement du Signal vol.13, 97 ainsi que actes journée thématique ISIS, Marly-Le-Roi, 1997