

DETECTION DE RUPTURES ET APPLICATION A LA CARACTERISATION DE SIGNAUX DE CHAUSSEE

N.K M'SIRDI *, R. RAMDANI *# Y. DELANNE °

* Laboratoire de Robotique de Paris

UPMC . 4, Place Jussieu. Paris. Cedex 05. France

Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediène

(USTHB). BP 31. Bab-ezzouar. 16111. Alger. Algérie.

° Laboratoire Central des Ponts et Chaussée

Nantes. France. BP 91. Bouguennais.

Résumé. Détecter les ruptures d'un signal information revient à effectuer un test d'hypothèse basé sur un rapport de vraisemblance et/ou un intervalle de confiance. Nous appliquons les méthodes GLR, χ^2 et Fisher à la variance du signal de chaussée non stationnaire, supposé aléatoire et filtré par le modèle du véhicule, et à celle de l'innovation après estimation paramétrique. Ceci permet une analyse des caractéristiques de la chaussée et des conséquences sur le confort du véhicule.

Abstract. Failure detection is implemented by hypothesis testing based on likelihood ratio and/or confidence interval (GLR method, χ^2 and Fisher's laws). We apply this technique to the non-stationary road profile signal filtered by a vehicle dynamics. The failure information we process is first, the filtered road profile signal variance and then, the innovation variance obtained by a recursive parameters estimation. The results allows us to deducte the road characterization and the vehicle comfort.

1. INTRODUCTION

La détection de rupture de modèle est une étape primordiale et un complément naturel à un traitement adaptatif ou évolutif de signaux non stationnaires. Elle a fait l'objet d'études dans des domaines variés tels que le contrôle des systèmes dynamiques [Basseville 81], la détection de défauts [Chow 86], le traitement du signal de parole [Obretch 88], en biomédical [Corge 86], en traitement d'images [Basseville 81], et en filtrage adaptatif [Tjokronegoro 90].

Notre objectif étant de caractériser des signaux de chaussée, nous nous sommes intéressés à deux aspects: ** le traitement adaptatif des signaux pour valider une modélisation des signaux par une détection de rupture de modèle. **la caractérisation du profil de la chaussée et les conséquences sur le contrôle du mouvement d'un robot rouleur ainsi que sur le confort du véhicule, par une détection de rupture par rapport à un profil de référence.

Détecter une rupture de modèle revient à effectuer le test d'hypothèse: (i) H_0 : il n'y a pas de rupture; (ii) H_1 : il y a rupture. Ce test est basé sur des méthodes statistiques faisant intervenir soit le rapport de vraisemblance pour la méthode GLR (rapport de vraisemblance généralisé) [Ljung 87] [Tjokronegoro 90], soit l'intervalle de confiance pour les méthodes basées sur les lois χ^2 et Fisher [Bendat 87].

Nous appliquons le test GLR sous une forme nouvelle: nous écrivons le test de décision sous forme récursive et nous introduisons dans le rapport de vraisemblance un intervalle de confiance pour appliquer à la déviation du rapport de vraisemblance un test χ^2 . Ce qui supprime la difficulté du choix du seuil. Nous montrons que le test Fisher a la particularité de s'appliquer à un rapport de variance, ce qui permet de comparer des signaux.

2. DETECTION DE RUPTURE

Pour détecter les changements brusques ou ruptures de modèle, il existe 5 étapes: 1) définir le signal information, 2) définir le test de décision, 3) déterminer l'instant de rupture, 4) estimer la rupture, 5) compenser la rupture.

Nous nous sommes intéressés tout particulièrement aux étapes 1) et 2) que nous développons dans la suite; quant aux étapes 3) et 4) nous les réalisons de manière implicite dans notre application car nous considérons l'instant de rupture comme étant celui de sa détection, et l'estimation de la rupture comme étant la valeur du signal information à l'instant de rupture. La dernière étape qui concerne la compensation de rupture n'intervient pas au stade actuel de notre objectif, mais fera l'objet de considérations ultérieures.

Le signal information. Le signal information doit être porteur de l'information de rupture, aussi suivant l'application considérée, il peut être choisi comme étant : 1) la sortie du système [Desay 84, Chow 86, Clark 85, Kailath 80], 2) la variance de la sortie [Ramdani 91], 3) l'innovation ou l'erreur de prédiction [Willsky 76], 4) la variance de l'innovation [Ramdani 91], 5) le vecteur paramètres [Tjokronegoro 90], 6) l'erreur des estimations de paramètres [Hagglund 83, Tjokronegoro 90, Chun Yang 87], 7) la statistique instrumentale [Basseville 87].

Notre application porte sur le profil de la chaussée; aussi en fonction des deux aspects qui nous intéressent, nous avons construit deux signaux information: (i) la variance du signal représentant le profil de la chaussée afin de caractériser la chaussée, (ii) la variance de l'erreur de prédiction afin de valider la modélisation du profil de la chaussée.

Le test de décision. Le choix du test de décision de rupture va



dépendre de la loi sur laquelle il est basé et des deux compromis désirés entre la complexité et l'efficacité et, entre les fausses alarmes et le retard à la détection.

3. TEST D'HYPOTHESE

3.1 INTERVALLE DE CONFIANCE

Définition. [Bendat 87] [Ramdani 91]. Le test d'hypothèse peut se ramener à la définition d'un intervalle de confiance défini pour un estimateur $\hat{\phi}$ et pour une valeur α du niveau de signification par la valeur que prend sa densité de probabilité; en effet, on peut considérer:

** une région d'acceptation de l'hypothèse telle que

$$Pr ob[\hat{\phi}_{1-\alpha/2} < \hat{\phi} < \hat{\phi}_{\alpha/2}] = \int_{1-\alpha/2}^{\alpha/2} p(\hat{\phi})d\hat{\phi} = 1 - \alpha$$

** une région de rejet ou region critique définie par

$$Pr ob[\hat{\phi} \leq \hat{\phi}_{1-\alpha/2}] = \int_{-\infty}^{\hat{\phi}_{1-\alpha/2}} p(\hat{\phi})d\hat{\phi} = \alpha / 2 \quad Pr ob[\hat{\phi} > \hat{\phi}_{\alpha/2}] = \int_{\hat{\phi}_{\alpha/2}}^{\infty} p(\hat{\phi})d\hat{\phi} = \alpha / 2$$

Loi χ^2 et estimation de variance. Pour des variables z_i aléatoires gaussiennes ($z_i \in N(0,1), \forall i$), on peut définir une variance standardisée: $n \frac{s_z^2}{\sigma_z^2} = \chi_n^2, n = N - 1$

comme une variable χ^2 à n degrés de liberté ($s_{z_i}^2$ étant l'estimée de $\sigma_{z_i}^2$). L'intervalle de confiance pour une estimation de variance avec un coefficient $(1-\alpha)$ s'exprime alors: $\frac{ns_z^2}{\chi_{n,\alpha/2}^2} \leq \sigma_z^2 < \frac{ns_z^2}{\chi_{n,1-\alpha/2}^2}$

Loi Fisher et estimation de rapport de variance [Bendat 87] [Ramdani 91]. Le rapport de variance suit la distribution Fisher:

$$F_{n_1, n_2} = \frac{\chi_{n_1}^2 / n_1}{\chi_{n_2}^2 / n_2} \quad \text{La probabilité des valeurs futures de ce rapport s'exprime } Pr ob\left[\frac{s_1^2}{s_2^2} > \left(\frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2}\right) F_{n_1, n_2, \alpha}\right] = \alpha$$

Le test d'hypothèse devient: ** H_0 : pas de rupture: $s_{z_i}^2$ est l'estimée de $\sigma_{z_i}^2$ sur 2 fenêtres glissantes indépendantes de longueurs fixées n_1 et n_2 . ** H_1 : il y a rupture: la nouvelle valeur du rapport $\frac{s_{z_i}^2}{s_{z_i}^2}$ est égale à $\frac{\sigma_{z_i}^2}{\sigma_{z_i}^2}$ jusqu'au prochain saut. Le test se fait sur $F = \frac{s_1^2}{s_2^2} \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2}$ et son inverse suivant la nature du front (positif ou négatif).

3.2 RAPPORT DE VRAISEMBLANCE.

La méthode GLR est basée sur la fonction densité de probabilité (PDF) $p(z_1(k))$ des variables aléatoires $z_1(k)$. La PDF est maximum pour les valeurs les plus probables de $z_1(k)$.

Forme récursive du rapport de vraisemblance (LR).

Le rapport de vraisemblance est la PDF conjointe pour le vecteur aléatoire observable, c-à-d les paramètres résultants de la réalisation sous l'hypothèse H_1 : ** H_0 : $z(k) = h(x_0(k)) + v(k)$: pas de rupture, ** H_1 : $z(k) = h(x_1(k)) + v(k)$: il y a rupture.

L'hypothèse de variables aléatoires indépendantes nous permet d'écrire le rapport des densités de probabilités de $z(k)$ sous la forme suivante:

$$L[z(k)] = \frac{p[z(k)/H_1]}{p[z(k)/H_0]} = \prod_{t=k_0}^k \frac{p(z(t)/z(t-1), H_1)}{p(z(t)/z(t-1), H_0)}$$

Le rapport de vraisemblance (LR) s'écrit alors:

$$L_n L[z(k)] = LL(z(k)) = \sum_{t=k_0}^k \left[\frac{p(z(t)/z(t-1), H_1)}{p(z(t)/z(t-1), H_0)} \right]$$

Nous pouvons exprimer la forme récursive du LR ainsi:

$$T_k = LL_{k_0}^k(z(k)) = LL_{k_0}^{k-1}(z(k)) + \left[\frac{p(z(t)/z(t-1), H_1)}{p(z(t)/z(t-1), H_0)} \right]$$

$$T_k = T_{k-1} + dl_k \quad dl_k > \lambda$$

Le test de décision peut donc porter sur dl_k déviation du rapport de vraisemblance; il devient alors: $dl_k > \delta$ Le problème de cette méthode réside dans la difficulté du choix du seuil δ On peut remarquer que le test porte sur le rapport de vraisemblance LR dans le cas d'une détection de rupture; mais pour faire une estimation de cette rupture, on s'intéressera au maximum du LR.

Détection de rupture de variance par LR. Si $z(k)$, échantillon de variables aléatoires indépendantes, suit la loi de probabilité normale $z(k) \sim N[m, s_1^2]$; $E(z(k)z(l)) = 0$; ** H_0 : $z(k) \sim N[m, s_0^2]$: pas de rupture ** H_1 : $z(k) \sim N[m, s_1^2]$: il y a rupture; s_0^2 et s_1^2 sont des valeurs distinctes de variances et la déviation minimum de variance s'écrit : $s_1^2 - s_0^2 \geq h_s > 0$; la forme récursive du LR devient:

$$T_k = LL_1^k(z(k)) = LL_1^{k-1}(z(k)) - \frac{1}{2} \frac{h_s}{s_1^2} \frac{(z(k) - m)^2}{s_1^2 - h_s}$$

Le test de décision porte alors sur

$$dl(k) = - \frac{1}{2} \frac{h_s}{s_1^2} \frac{(z(k) - m)^2}{s_1^2 - h_s}$$

Introduction de l'intervalle de confiance dans le rapport de vraisemblance. La difficulté réside dans le choix du seuil δ . Nous avons levé cette difficulté en écrivant la déviation

$$dl(k) = - \frac{1}{k_2} \frac{(z(k) - m)^2}{s_1^2}$$

$$k_2 = 2 \frac{(s_1^2 - h_s)}{h_s} : \text{constante}$$

On considère alors la variable $dl(k)$ comme une variable χ^2 à un degré de liberté, normalisée par la constante k_2 structurée par un processus aléatoire gaussien de $z(k)$, de moyenne m et de variance s_1^2 Par conséquent, nous venons de montrer que la méthode GLR appliquée à la détection de rupture de variance dans le cas récursif ne peut donner lieu à un test cohérent, donc un résultat interprétable et exploitable que si elle est complétée par un test basé sur la loi χ^2 .

Détection de rupture de variance par la méthode GLR. Comme nous l'avons établi plus haut, le point le plus délicat du choix de seuil de la déviation du rapport de vraisemblance a été surmonté par la considération de cette déviation comme étant une variable χ^2 sur laquelle le test d'hypothèse faisant intervenir l'intervalle de confiance a été appliqué. Cependant, ce traitement n'est possible que lorsque la déviation de la variance h_s est définie.

choix de $h_s = s_1^2 - s_0^2$: intervalle entre la variance $s_1^2(k)$ à l'instant k et la variance de référence $s_0^2(k)$. (prise égale à la variance moyenne du signal considéré), Si on considère $\frac{\Delta v}{v_0} = \frac{v_1 - v_0}{v_0} \geq \frac{h_s}{v_0}$ la variation relative de la variance s_1^2 notée vi , la base du test devient $\frac{\Delta v}{v_0} \geq \alpha\%$ il y a rupture ; $\frac{\Delta v}{v_0} < \alpha\%$ pas de rupture

Ce qui nous permet de déterminer la déviation de la forme réursive du LR:

$$d(k) = -\frac{1}{2} \frac{\alpha v_0}{(v_1(k) - \alpha v_0)} \frac{(z(k) - m(k))^2}{v_1(k)}$$

4. APPLICATION A LA CARACTERISATION DES SIGNAUX DE CHAUSSEE

Le signal de chaussée, signal non stationnaire supposé aléatoire, est considéré engendré par un modèle Auto-Régressif excité par un bruit blanc. Son innovation est estimée par l'algorithme des moindres carrés récursifs. Ce traitement entre dans le cadre de l'analyse du confort de véhicules et du contact véhicule/route; les résultats obtenus nous permettent de définir la qualité de la route, de quantifier les défauts de la route de manière absolue (test χ^2 et GLR), et de comparer un profil à celui d'une chaussée idéale prise comme référence (test Fisher). Une analyse du confort dynamique de véhicules et une optimisation des paramètres de suspension relativement à un critère ont été réalisées dans les méthodes suivantes: a) optimisation des paramètres de suspension passive et/ou active en fonction du confort du véhicule et du maintien de la route soit (i) en construisant un index de performance et en minimisant un critère basé sur la DSP de l'accélération du signal de sortie sur toute la bande de fréquence effective [Lin 89], soit (ii) en réalisant un contrôle passif et/ou actif (commande en force) des déplacements verticaux et angulaires (découplés) de la charge [Karnopp 87], soit (iii) en établissant une procédure multi-critères de contrôle pour la sécurité (adhérence), le confort (absence de vibrations mécaniques), et la déflexion de la suspension [Foag 87]. b) établissement d'un critère de rugosité de la chaussée en considérant la variance de l'accélération subie par le passager en fonction de la réponse en fréquence du véhicule par l'évaluation de la conduite du véhicule [Quinn 82]. c) définition des qualités de la chaussée par la création d'échelles de sélection [Nick 82]. d) Caractérisation des effets de la rugosité (amplitude du profil) sur la dynamique du véhicule et la qualité de la conduite (amplitude de l'accélération du véhicule, de ses charges, et des forces subies par les amortisseurs) [Wambold 85].

Nous caractérisons les signaux de chaussée représentant le profil de la route, en construisant deux signaux information de rupture, après filtrage du signal de chaussée par le modèle d'un quart de véhicule (fig.1) [Wambold 85, Watagula 85]: **la variance de l'innovation du signal de sortie, **la variance du signal de sortie

D'autre part pour une estimation des paramètres de véhicules, les résultats obtenus à partir du signal information variance de l'innovation, seront exploités ultérieurement pour compenser les ruptures détectées et analyser les capacités de poursuite d'un algorithme de filtrage adaptatif

Pour les deux signaux information construits traitant des signaux de chaussée réels, nous avons adopté les conditions suivantes d'application: Le profil de chaussée étant un signal non stationnaire, nous avons estimé la variance de manière réursive sur une fenêtre glissante dont la taille constante n correspond à la largeur du segment quasi-stationnaire. **test χ^2 : nous avons appliqué le test d'hypothèse pour un intervalle de confiance de 5

% et un degré de liberté égal à 50. **test Fisher: nous avons comparé deux variances de la même chaussée calculées sur deux fenêtres glissantes de largeur constante (n1=20 et n2=50) en considérant leur rapport comme étant une variable Fisher. Pour ces deux précédents tests le choix du degré de liberté doit être fait correctement, ou sinon le test ne peut se faire et la détection de la rupture n'a pas lieu; en effet le nombre de degrés de liberté représente le nombre de carrés indépendants entrant dans l'expression de la variable aléatoire; aussi, nous choisissons le degré de liberté égal à la longueur de stationnarité de la chaussée. **test GLR: nous prenons comme variance de référence v_0 la valeur moyenne de la variance du profil de chaussée et nous avons considéré une variation h_s de variance égale à 10% v_0 ; nous déterminons alors la déviation du rapport de vraisemblance sur laquelle nous effectuons le test d'hypothèse pour un intervalle de confiance de 5% , à un seul degré de liberté. Nous obtenons des détections très franches et très nettes, sans fausse alarme: ** test χ^2 : nous montrons la superposition du signal variance avec le profil tracé à partir des détections de rupture obtenues par un test d'hypothèse basé sur la loi du χ^2 sur la figure 2 pour le signal de chaussée filtré, et sur la figure 3 pour son innovation. On peut remarquer qu'il n'existe aucune fausse alarme et que l'instant de la détection est égal à l'instant de rupture. ** test GLR: Ce test, à condition d'être complété par le test χ^2 indiqué, donne des résultats équivalents au précédent test (fig. 4 et 5). Les profils obtenus sont une reconstitution du signal information par un signal plus propre. La détection de rupture obtenue se comporte comme un filtrage du signal information. Ces profils indiquent les impulsions subies par le passager en fonction de la longueur de la chaussée; ils caractérisent la qualité de la route, les effets de la rugosité sur le confort du passager et la dynamique du véhicule. ** test Fisher: les ruptures à front >0 du rapport de variances sont représentées en traits pleins et celles à front <0 en pointillé (fig.6); ce résultat permet de caractériser une partie de la chaussée relativement à une autre prise comme référence.

5. CONCLUSION.

Nous avons montré qu'en détectant les ruptures par application d'un test d'hypothèse basé sur un rapport de vraisemblance et/ou un intervalle de confiance à l'aide des méthodes statistiques GLR , χ^2 et Fisher, nous avons réussi à traiter l'application.

Nous avons supposé que le signal traité est un processus aléatoire et que le profil de la chaussée représente la sortie d'un modèle AR à paramètres variant dans le temps, excité par un bruit blanc. Nous avons considéré comme signal information de rupture la variance de la sortie (filtrée par le modèle d'un véhicule) et celle de son innovation.

La méthode GLR a posé des problèmes de choix de seuil que nous avons levés en introduisant un intervalle de confiance et un test χ^2 . Les méthodes χ^2 et Fisher ne peuvent fonctionner que si le choix du degré de liberté respecte la longueur de stationnarité du signal information.

Les résultats obtenus pour la caractérisation des signaux



de chaussée, sont une extension des études précédemment citées, de la rugosité; ils ont permis d'analyser la qualité du profil étudié et en déduire les conséquences sur le confort.

Pour estimer les paramètres de véhicules et optimiser la suspension, les résultats (fig.5et3) seront exploités ultérieurement pour compenser les ruptures détectées et améliorer les performances de l'algorithme d'estimation adaptative des paramètres.

REFERENCES

- [Basseville 81]. M.Basseville. IEEE. TASSP. ASSP-29, 32-50.
 [Basseville 86]. M.Basseville. Benveniste. S Verlag. 77 1986.
 [Basseville 87]. M.Basseville. Benveniste. Moustakides. Rougee. 1987. Automatica 23, p 479-489.
 [Basseville 88]. M.Basseville. Automatica, Vol. 24, p 309-326.
 [Basseville 89]. M.Basseville. GRETSI. Vol.6 n° spécial 1989.
 [Bendat 87]. J.Bendat. A.Piersol. Rand. Data. Pr. Hall. 1987.
 [Chow 1986]. Chou. Lou. Verghese. Willsky. Ch.9 p 275-294. LNCIS Proc. 77.
 [Chun Yang 87]. Chun Yang. Bertrand. Mariton. IEEE. ICASSP-87 p 1111-1114.
 [Clark 75]. Clark. Fosth. Walton. IEEE TAES. Vol. AES 11/4.
 [Corge86] Corge. Puech. 1986. Pr.INRIA 7. ICAOS. Ant. France.
 [Desay 84]. Desay. Ray. Proc Am Cont Co SanDiégo. 262-270.
 [Foag 87]. Foag. Grübel. IFAC.10th T W C. Munich FRG 1987.
 [Hagglund 89]. Hagglund. Doct. Dissert. Iund Univers. Sweden.
 [Kailath 80]. Kailath. Prentice Hall. Englewood Cliffs NJ.
 [Karnopp 87]. Karnopp. IFAC 10th Tr W C Munich FRG 1987.
 [Lin 89]. Lin. Zhang. J. of S / Vibr. 133(2), 239-249, 1989.
 [Ljung. 87]. Ljung. Prentice Hall. N.J. 1987.
 [M'Sirdi 88]. K.N.M'Sirdi. 9/88. Thèse .Doct. d'état, INPG.France
 [Nick 82]. Nick. Janoff. Transportation Research Record 946.
 [Obrecht 88]. Obrecht, R. 1988. IEEE. ASSP-36, 29-40.
 [Quinn 82]. Quinn. Transportation Research Record 946.
 [Ramdani 91]. Ramdani. M'sirdi. IMACS. 1991 IDN. Lille.
 [Tjokronegoro 90].Tjokronegoro. 9/90. Thèse Doct. INPG France.
 [Wambold 85]. Wambold ASTM STP 884.
 [Watagula 85]. Watagula Hayhoe ASTM STP 884.
 [Willsky 74]. Willsky IEEE 1974 DCC. p. 854-863 Arizona.
 [Willsky 76]. Automatica 12. p. 601-611.

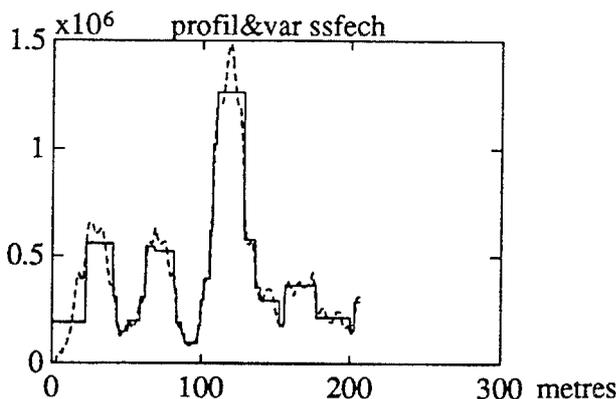


Fig. 2. Test χ^2 sur la variance du signal

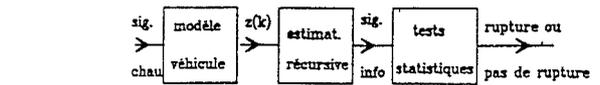


Fig.1 Application au signal de chaussée

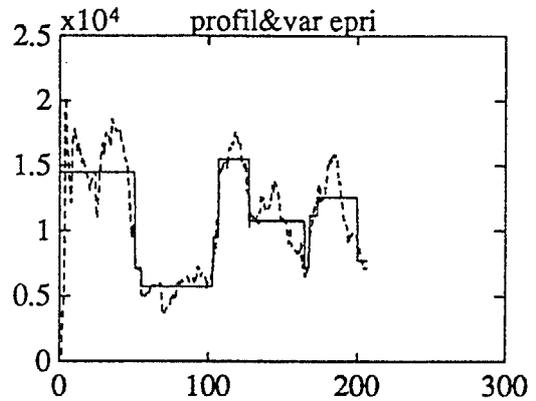


Fig. 3. Test χ^2 sur la variance de l'innovation

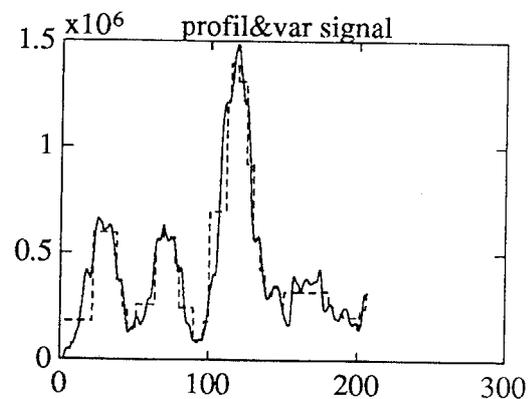


Fig. 4. Test GLR sur la variance du signal

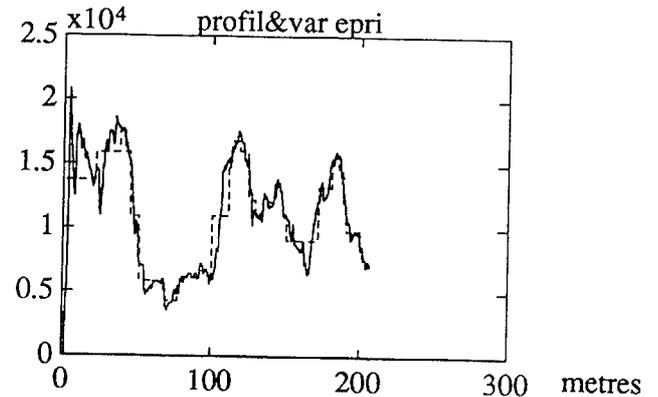


Fig. 5. Test GLR sur la variance de l'innovation

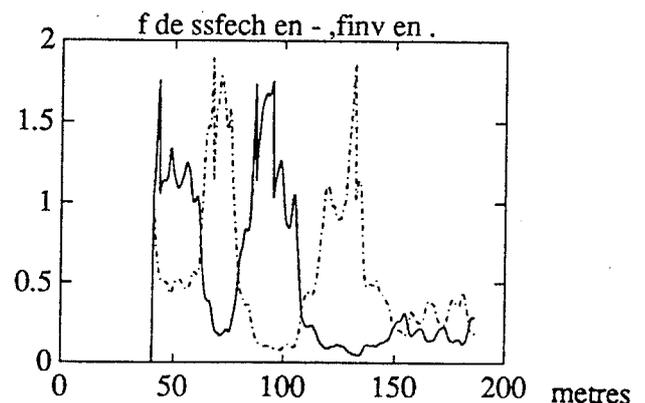


Fig. 6. Test Fisher sur la variance du signal