

Estimation adaptative du profil de vent par Radar Doppler: Modélisation et Traitement

Gwenaëlle LE FOLL ^{1,2}, Pascal LARZABAL ¹ et Henri CLERGEOT ²

¹: LESIR-Ecole Normale Supérieure de Cachan, 61 av. du Pdt Wilson, 94235 Cachan Cedex, France.
tel: (1) 47-40-27-09, fax: (1) 47-40-27-08, email: lefoll@ens-cachan.fr

²: LTSMM- UAG- Campus St Denis, av. d'Estree, BP792, 97337 Cayenne Cedex, Guyane Française.
tel: (594) 30-42-00, fax: (594) 30-79-53

RESUME

Le travail rapporté dans cet article concerne le relevé du profil de vent en altitude. Certaines méthodes classiques habituellement utilisées sont présentées. Nous proposons une nouvelle modélisation du spectre du signal rétrodiffusé. Contrairement à certaines modélisations classiques, cette dernière reste robuste même en présence de variation brutale de la réflectivité. L'originalité de la méthode que nous proposons repose sur l'utilisation conjointe d'un modèle paramétrique d'évolution spatiale de la vitesse du vent et de la modélisation précédente. Un algorithme itératif permet de suivre de manière continue l'évolution temporelle du profil de la vitesse du vent. Les paramètres du spectre modélisé sont remis à jour à chaque itération afin de minimiser un critère de distance entre spectre observé et spectre modélisé. Les modèles proposés tiennent compte des fluctuations physiques de l'atmosphère.

Des études en simulation confirment les résultats attendus et viennent compléter les analyses théoriques en présentant certaines limitations.

I. INTRODUCTION

L'objectif de cet article est de présenter une nouvelle méthode de traitement du signal pour l'estimation du profil de vent en air clair. La mesure de la vitesse du vent s'effectue par radar Doppler, à partir de la fréquence Doppler de l'écho de l'onde incidente, rétrodiffusée par les turbulences de l'atmosphère. Les techniques classiques sont fondées sur le calcul du spectre par FFT, de la fonction d'auto-corrélation [1] ou le filtrage sélectif adaptatif [2]. Ces diverses méthodes ne prennent pas en compte un modèle réaliste du signal rétrodiffusé et les résultats se trouvent biaisés si le profil de réflectivité des "cibles" varie brusquement au sein du volume sondé. Le rapport signal sur bruit est un paramètre qui limite actuellement les techniques classiques. Le paragraphe 2 présente un bref état de l'art des algorithmes actuels et leurs limitations. Le paragraphe 3 expose une extraction originale de l'écho atmosphérique. Un modèle robuste du spectre rétrodiffusé est introduit dans le paragraphe 4. L'utilisation conjointe de ce modèle et d'un algorithme de descente (de type gradient) est à l'origine d'une méthode d'estimation adaptative qui est décrite dans le paragraphe 5. Des simulations viennent illustrer le comportement prédit. Une comparaison avec les estimateurs actuels est effectuée dans le paragraphe 6. Une conclusion est finalement tirée en 7.

II. BREF ETAT DE L'ART

Les données disponibles pour la mise en oeuvre des divers algorithmes classiques sont des séries temporelles, composées d'échantillons complexes régulièrement espacés. Notre discours porte essentiellement sur les estimateurs des moments d'ordre un et deux de la densité spectrale.

La référence [1] simule un signal météorologique de précipitation, caractérisé par son spectre $S(f_n)$ ou sa fonction d'auto-corrélation $R(\tau)$, et compare trois estimateurs de fréquence. Le rapport signal sur bruit y est meilleur que dans le cas du sondage en air clair, où la réflectivité

ABSTRACT

This work focuses on wind profile estimation. Usual methods used for wind recording are presented. This paper proposes a new model for backscattered signal spectrum. In opposite to classical results, this modelization is a robust one, even in presence of steep reflectivity fluctuations. Conjoint use of this model and an other spatial parametric one for wind speed is an original approach for signal processing. An iterative algorithm can continuously follow wind speed temporal evolution. Spectral parameters are updated in order to minimize a criterium of discrepancy between the received spectrum and the modeled one. Proposed models take into account atmospheric fluctuations.

Simulations give the expected results, and complement the theoretical analysis.

est très faible. L'estimateur de la fréquence moyenne du spectre calculé par FFT est donné, comme barycentre du spectre, par:

$$\hat{f}_{FFT} = \frac{\sum_n f_n S(f_n)}{\sum_n S(f_n)} \quad (1)$$

Cet estimateur est non biaisé pour des rapports signal sur bruit élevé. Pour des rapports Signal sur Bruit (RSB) plus faibles, il faut éliminer l'influence du bruit.

Transposé dans le domaine temps, le même estimateur correspond à la dérivée de l'argument de la fonction d'auto-corrélation évaluée en zéro, soit pour de petite valeur de $\tau_e \neq 0$, à l'approximation suivante:

$$\hat{f}_{cov} = \frac{1}{2\pi\tau_e} \cdot \arg[R(\tau_e)] \quad (2)$$

Dans le cas de densité spectrale symétrique, cet estimateur est asymptotiquement non biaisé. Si les observations constituent des paires d'échantillons complexes, Z_n , régulièrement espacés de τ_e , la fonction d'auto-corrélation est estimée par:

$$R(\tau_e) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N Z_{n+1} \bar{Z}_n \quad (3)$$

Cette équation est la base de l'algorithme *polypulse pair* (PPP) qui estime sans biais la fréquence moyenne normalisée (Im et Re représentent respectivement les parties réelle et imaginaire des produits complexes):

$$\hat{f}_{PPP} = \frac{1}{\pi} \cdot \arctan \frac{\sum_n \text{Im}(Z_{n+1} \bar{Z}_n)}{\sum_n \text{Re}(Z_{n+1} \bar{Z}_n)} \quad (4)$$

Ces trois estimateurs sont performants dans le cas de densités spectrales de puissance gaussiennes, de paires d'échantillons indépendantes et de bruit blanc.

Les signaux réels sont issus des rétrodiffusions, provoquées par des fluctuations d'indice de réfraction de l'air, la puissance du signal reçu est très faible et varie au sein du volume sondé suivant les conditions



hériques. L'hypothèse de spectre gaussien devient dès lors trop restrictive pour les cas de signaux réels. Une nouvelle méthode basée sur une modélisation fine du signal est alors proposée et simulée. Cette nouvelle modélisation s'accommode aisément d'une variation brutale de la réflectivité.

III. L'EXTRACTION DU SIGNAL UTILE

Le signal observé (noté \mathbf{x}) par l'antenne comporte des signaux parasites tels que l'écho de sol (noté \mathbf{x}_{sol}), d'éventuelles interférences déterministes (réflexions sur des avions, notées \mathbf{x}_{int}) et du bruit:

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_{atm} + \mathbf{x}_{sol} + \mathbf{x}_{int} + \text{bruit} \quad (5)$$

Le signal reçu est difficilement exploitable dès sa réception. Il est nécessaire de réaliser divers traitements, afin d'extraire le signal atmosphérique, noté \mathbf{x}_{atm} .

1) Extraction de l'écho de sol.

Cette composante de signal quasi invariante en amplitude et phase est de nature déterministe. Le modèle proposé est une approximation polynomiale du signal temporel complexe. Le signal \mathbf{x}_{sol} est estimé par la projection du signal \mathbf{x} sur une base polynomiale. Soit U la base considérée, le projecteur est la matrice $P=UU^{\#}$ ($U^{\#}$ est la matrice pseudo inverse de U). Le signal démuné de l'écho de sol est:

$$\mathbf{y} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_{sol} = \mathbf{x} - P\mathbf{x} = (I - P)\mathbf{x} \quad (6)$$

Bien que le signal atmosphérique soit perturbé par cette opération, le biais de l'estimateur du spectre de \mathbf{y} est plus faible que celui de l'estimateur direct du spectre de $\mathbf{x}_{atm} + \mathbf{x}_{sol}$.

2) Détection et suppression des interférences.

Ce type de signal provient de cibles localisées renvoyant un écho cohérent. La fréquence Doppler mesurée dans le cas des interférences est la fréquence Doppler f_0 de la cible en mouvement. L'analyse s'effectue sur tous les spectres FFT obtenus à chaque porte (non indépendants du fait du filtre de réception). La première étape consiste à détecter la présence de l'interférence $i(t)$. L'amplitude des différents spectres est relevée en fonction de l'altitude. Le pulse émis apparaît sur ce tracé si un écho cohérent survient (figure 1). Cette remarque peut être à l'origine d'un test automatique d'interférences déterministes.

Soit M le numéro de la porte contenant le plus fort signal cohérent, apparaissant comme une raie à ω_0 . Le signal temporel correspondant est de la forme [3]:

$$y_M(t) = i_M(t) \cdot \exp(j\omega_0 t) + z_M(t) \quad (7)$$

où $z_M(t)$ représente le signal atmosphérique bruité, et $i_M(t)$ une fonction complexe lentement variable. $i_M(t)$ est estimé par filtrage sélectif et démodulation à la fréquence f_0 , puis lissage de l'amplitude $A_M(t)$ et de la phase $\phi_M(t)$, conduisant à:

$$\hat{i}_M(t) = \hat{A}_M(t) \cdot \exp(j\hat{\phi}_M(t)) \quad (8)$$

Le signal atmosphérique de la porte considérée est le signal $y_M(t)$ dépourvu de son signal cohérent, remodulé à la fréquence f_0 :

$$z_M(t) = y_M(t) - \hat{i}(t) \text{ avec } \hat{i}(t) = \hat{i}_M(t) \cdot \exp(j\omega_0 t) \quad (9)$$

Le signal d'interférence correspond à une cible localisée à l'altitude de la porte M , mais du fait de la largeur du pulse, le signal se retrouve sur les portes voisines, avec l'amplitude k_p :

$$y_p(t) = k_p \cdot \hat{i}(t) + z_p(t) \quad (10)$$

Le coefficient k_p est estimé par la minimisation sur toutes les portes de l'erreur quadratique. En notant, y_p le vecteur des échantillons du signal de la porte p et \hat{i} celui de l'interférence, il vient:

$$\hat{k}_p = \arg \min_{k_p} \left[\sum_t |y_p(t) - k_p \cdot \hat{i}(t)|^2 \right] = \frac{\hat{i}^t \cdot y_p}{\hat{i}^t \cdot \hat{i}} \quad (11)$$

3) Résultats.

Cette technique est maintenant testée sur des données de Météo France relevées au voisinage d'un aéroport, au moment du décollage d'un avion. Les caractéristiques de l'enregistrement sont les suivantes: fréquence du radar de 45 MHz, 64 additions cohérentes, 128 points FFT, une période de répétition des pulses de 156.25 μ s. Les différentes étapes précédentes sont illustrées sur les figures suivantes.

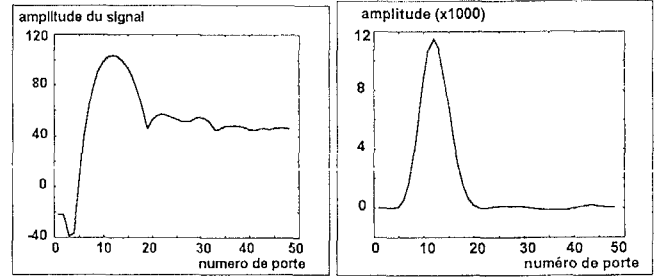


figure 1
Estimation de l'indice M afin d'obtenir ω_0
sur le spectre correspondant

figure 2
Détection de l'interférence

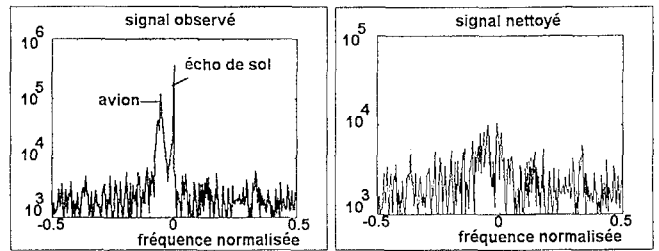


figure 3
spectre du signal observé sur la porte M

figure 4
Estimation du spectre du signal
atmosphérique correspondant

L'extraction proposée a efficacement reconstitué l'écho atmosphérique. Il faudrait toutefois optimiser l'ordre des différentes bases polynomiales utilisées et traiter le cas de plusieurs interférences simultanées.

Disposant de données réelles, nettoyées des signaux parasites, une nouvelle technique de traitement est proposée dans le paragraphe 5. Elle sera basée sur l'ajustement adaptatif du spectre reçu avec le modèle de spectre qui va maintenant être décrit.

IV. UN MODELE PHYSIQUE POUR LES ONDES RETRODIFFUSEES.

1) Un modèle non gaussien pour une porte.

Le modèle gaussien, classiquement utilisé, est justifié si la réflectivité de la turbulence est constante sur tout le volume sondé [4]. La largeur du pulse émis définit un volume équivalent trop grand pour appliquer cette hypothèse restrictive. Ce manque de robustesse a motivé l'étude que nous allons maintenant présenter.

Le principe est de découper chaque porte en fines strates, sur lesquelles l'hypothèse du spectre gaussien reste valable. Le signal rétrodiffusé par une porte est le résultat de la contribution des rétrodiffusions élémentaires créées par les strates constitutives de la porte. Le spectre Doppler de la porte considérée est donc une somme pondérée de gaussiennes [3], [5]

$$\hat{S}_p(f_n) = \sum_i Q W_{p_0}^2 \cdot R_i \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{f_n - f_i}{\sigma_i}\right)^2\right) \quad (12)$$

L'équation (23) fournit la correction effectuée par un pas de l'algorithme du gradient qui minimise le critère Q de l'équation (16) après la pondération de l'équation (19). Un algorithme itératif a été ainsi défini et les paramètres sont mis à jour à l'itération k suivant:

$$a_{k+1} = a_k - \Delta a \quad (24)$$

3) Résultats de simulation.

L'algorithme est testé sur des données simulées. Le spectre atmosphérique réel est un tirage aléatoire du modèle, auquel se rajoute une puissance de bruit constante σ_b^2 :

$$s_p = (\hat{s}_p + \sigma_b^2) \cdot (1 + n_p) \quad (25)$$

n_p est un vecteur de variables aléatoires gaussiennes issu de la loi normale $n_p \sim \mathcal{N}\left(0, \frac{1}{N_m} \cdot I_d\right)$

a) Convergence de l'algorithme pour un profil donné

Dans un premier temps, l'écho atmosphérique est simulé à partir d'un profil de vitesse expérimental relevé dans [6]. La simulation est effectuée sur 20 portes composées chacune de 4 strates épaisses de $\Delta l = 150m$. La portée simulée du radar est donc de 12 km. La puissance de bruit introduite est constante pour chacune des portes, et par conséquent, le rapport signal sur bruit évolue entre 10 dB et 40 dB sur toute la portée du radar. Les spectres sont simulés avec 128 points et 100 additions incohérentes.

L'algorithme est initialisé à l'aide de la méthode poly pulse pair introduite en (4). La variance donnée par l'équation (15) est adaptée itérativement de la manière suivante:

$$\tilde{\sigma}_{k+1}^2 = \sigma^2 + \left(\frac{\Delta f_k}{2}\right)^2 \quad (26)$$

avec:

$$\Delta f_k = f_d(k) - f_d(k-1) \quad (27)$$

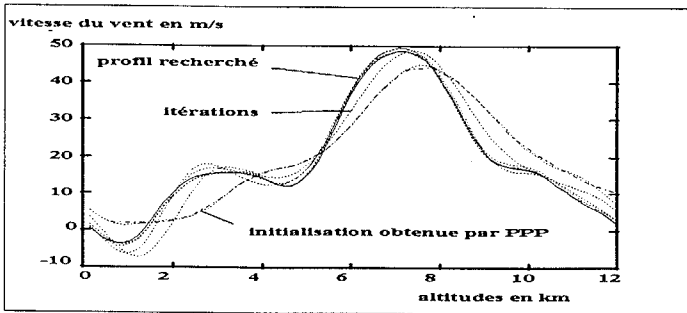


figure 6
convergence de l'algorithme de descente

Une convergence correcte de l'algorithme est obtenue en quelques itérations.

b) Suivi adaptatif d'un profil non stationnaire

Supposons maintenant que le profil du modèle évolue de façon continue au cours du temps. L'algorithme itère en permanence pour suivre l'évolution temporelle du vent. Les paramètres sont ajustés à partir des paramètres du profil de l'étape précédente. Malgré l'évolution extrêmement rapide du profil du vent, **une seule itération** de l'algorithme entre chaque estimation fournit une estimée correcte du profil. La figure (7) en présente les résultats dans les mêmes conditions de simulation que précédemment. Dans l'exemple simulé, le profil se translate rapidement vers le haut.

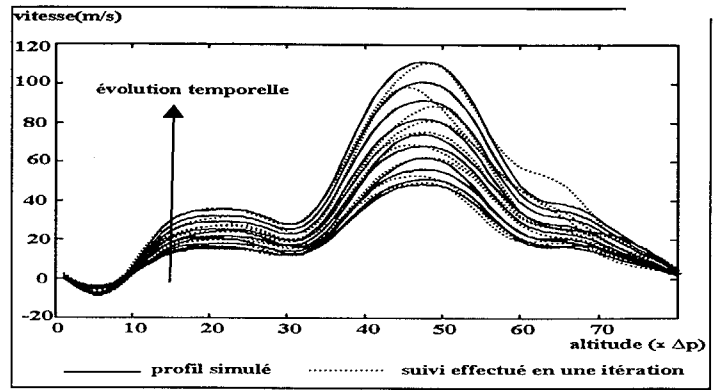


figure 7
suivi du profil de vent

VI. COMPARAISON AVEC LES ESTIMATEURS CLASSIQUES

Ce paragraphe présente une comparaison des performances statistiques (biais, variance) des trois estimateurs de la fréquence Doppler présentés dans cet article, à savoir: le calcul du moment d'ordre 1 (M1), l'algorithme poly pulse pair (PPP) et l'estimateur paramétrique (EP) proposé. Le résultat obtenu est illustré par la figure (8). Une nette amélioration des performances est obtenue grâce à l'utilisation de la méthode proposée dans cet article.

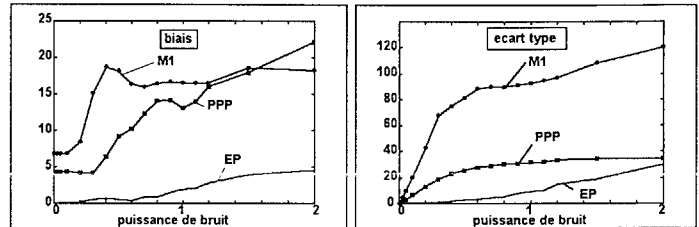


figure 8
Comparaison des estimateurs du moment d'ordre 1, du poly pulse pair et de l'algorithme itératif.

VII. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Une extraction de l'écho atmosphérique, fondée sur des techniques de projection a été proposée et testée sur des données réelles. Une modélisation robuste du spectre du signal rétrodiffusé a été introduite. Cette modélisation a permis de développer un algorithme d'extraction du profil de vent, qui a été mis au point et testé sur des données synthétiques. La technique proposée devrait permettre un suivi en temps réel du profil de la vitesse du vent. Cet algorithme doit maintenant être confronté à des données expérimentales sous un scénario connu.

VIII. REFERENCES

- [1] Sirman D., Bumgarner B.: Numerical comparison of five mean frequency estimators, J. Appl. Meteor., 14, pp. 991-1003, 1975.
- [2] Zarader, M'Sirdi, Ancellet, Flamant et Dabas: "Poursuite de fréquence pour l'estimation du Doppler vent" Treizième colloque Grets, Juans-les-pins, pp 113-116, 16-20 septembre 1991
- [3] Le Foll G., Larzabal P., Clergeot H.: "Wind profile estimation with Doppler radar: a general framework", accepté pour publication dans Contributions to atmospheric physics.
- [4] Doviak R.J., Zrnick D.S.: "Doppler radar and weather observations", second edition, Academic press, 1993.
- [5] Le Foll G., Larzabal P., Clergeot H.: "Relevé adaptatif du profil de vent au-dessus d'une base de lancement", Conférence européenne des essais et télémétries, Toulon 30mai-1^{er} juin, 1995, pp 369-383.
- [6] Sauvageot: "Radarmétéorologie, télédétection active de l'atmosphère", Eyrolles, 1990.



La porte p , respectivement i , se rapporte au numéro de la porte considérée, respectivement de la strate. $\mathcal{W}_{k,i}$ est la pondération sur la strate i correspondant à un pulse centré sur la $k^{\text{ième}}$ strate. P_0 est le nombre de strates formant une porte. f_n est la $n^{\text{ième}}$ composante en fréquence du spectre et f_i est la fréquence Doppler moyenne pour la strate i . R_i est l'amplitude du spectre rétrodiffusé par la $i^{\text{ème}}$ strate. Le modèle proposé caractérise chacun des spectres élémentaires grâce aux paramètres suivants: f_i , R_i , σ_i .

2) Un modèle paramétrique d'évolution spatiale pour la fréquence Doppler.

Le profil du vent est représenté dans le domaine des fréquences par une série de Fourier tronquée, paramétrée par le vecteur de paramètres \mathbf{a} :

$$\hat{f}_k = \sum_{m=-M/2}^{M/2} a_m \cdot e^{2\pi i m k / I} \equiv B \cdot \mathbf{a}, \quad k = 1, \dots, I \quad (13)$$

où M est l'ordre du modèle, B est la matrice $N \times I$ de la décomposition trigonométrique utilisée, I le nombre total de strates.

3) L'amplitude du spectre Doppler.

La puissance $R(z)$ du spectre rétrodiffusé décroît avec le carré de l'altitude z , et est liée au gain d'antenne par un coefficient A et à la réflectivité $r(z)$, de la strate. La réflectivité est une grandeur directement reliée aux paramètres physiques de la turbulence [4], [6]. Il vient:

$$R(z) = \frac{A \cdot r(z)}{z^2} \quad (14)$$

4) La variance des vitesses.

La variance du spectre Doppler est reliée aux fluctuations de vitesse qui existent au sein du volume sondé [6]. Nous pouvons faire l'hypothèse que le spectre issu d'une strate est la somme continue de tous les spectres infinitésimaux gaussiens (supposée de même variance σ) la constituant, pondérées par la forme supposée gaussienne de la strate. Sous ces conditions, il est établi (cf. [5]), que le spectre issu d'une strate i est gaussien de variance σ_i . Cette variance peut être reliée, au premier ordre, aux cisaillements de vent et il vient:

$$\sigma_i^2 = \sigma^2 + \left(\frac{\Delta_i(f)}{2} \right)^2 \quad (15)$$

$\Delta_i(f)$ représente l'écart de fréquence Doppler qui existe entre les deux strates adjacentes i et $i+1$. $\Delta_i(f)$ n'étant évidemment pas connu, il sera lui aussi estimé itérativement comme cela sera exposé dans les paragraphes suivants.

V. ESTIMATION DES PARAMETRES DU PROFIL DE VENT

La méthode envisagée est d'ajuster le spectre modélisé par l'équation (12) sur le spectre reçu (figure 5). D'après l'équation (13), il s'agit d'estimer le vecteur \mathbf{a} .

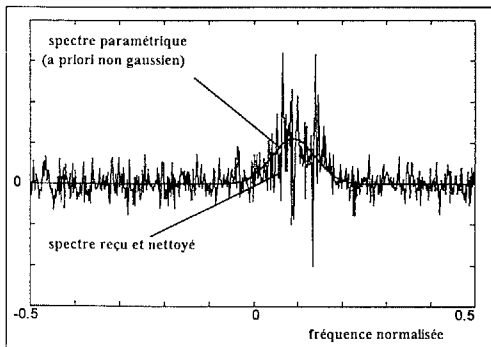


figure 5
ajustement adaptatif du spectre paramétrique avec le spectre reçu.

1) Le critère.

L'ajustement de ces deux spectres s'effectue par la minimisation d'un critère de distance:

$$Q = \sum_p (s_p - \hat{s}_p)^2 \quad (16)$$

où s_p et \hat{s}_p représentent respectivement les vecteurs des spectres observé et paramétré de la porte p . Les composantes de \hat{s}_p vérifient l'équation (12).

2) Un algorithme de descente pour l'optimisation

Les variations de spectres sont définies par:

$$d\hat{S} = \sum_{m=0}^{2M} \frac{d\hat{S}}{da_m} \cdot da_m = \sum_{m=0}^{2M} \dot{S}_m \cdot da_m \quad (17)$$

\hat{S} est la matrice formée des spectres théoriques de chaque porte: $\hat{S} = [\hat{s}_1 \ \dots \ \hat{s}_P]$, P étant le nombre total de portes. L'équation (17)

représente la matrice des variations de \hat{S} par rapport au vecteur paramètre \mathbf{a} : $d\hat{S} = [d\hat{s}_1 \ \dots \ d\hat{s}_p \ \dots \ d\hat{s}_P]$.

Le critère utilisé doit être pondéré du fait que l'amplitude des spectres évolue suivant l'équation (14). Il faut alors introduire une loi de pondération inverse du critère afin de débiaiser l'algorithme de descente. Les paramètres sont ainsi adaptés uniformément sur toutes les altitudes. Les éléments de la matrice $d\hat{S}$ doivent donc être pondérés à partir des valeurs $\mathcal{W}_p^2(z)$ et $R(z)$ pour que les contributions des différentes cases distance soient identiques. Soit α_p l'affaiblissement moyen correspondant au signal reçu de la porte p :

$$\alpha_p = \sum_i \mathcal{W}_i^2 \cdot R_i \quad (18)$$

Soit la matrice $A = [\alpha_1 \ \dots \ \alpha_P]$. La pondération recherchée est obtenue à l'aide de la matrice T définie par:

$$(T)_{ij} = (A)_{ij}^{-1} \quad (19)$$

La variation correspondante à prendre en compte dans l'algorithme d'adaptation est donc (\otimes étant le produit d'Hadamard):

$$T \otimes d\hat{S} \quad (20)$$

L'extension de l'équation (17) à des variations non infinitésimales, donne:

$$S - \hat{S} = \sum_{m=0}^{2M} \dot{S}_m \cdot (a - \hat{a})_m \quad (21)$$

Soit D la matrice des "vecteurs dérivés": $D = [\dot{s}_0 \ \dots \ \dot{s}_{2M}]$, où les vecteurs \dot{s}_m sont constitués des colonnes successives des matrices dérivées \dot{S}_m . Si $\Delta \mathbf{a} = \mathbf{a} - \hat{\mathbf{a}}$ est le vecteur des écarts de paramètres, il vient avec une écriture matricielle:

$$\mathbf{s} = \begin{bmatrix} s_1 \\ \vdots \\ s_P \end{bmatrix} \quad \mathbf{s} - \hat{\mathbf{s}} = D \cdot \Delta \mathbf{a} \quad (22)$$

Cette équation se résout aisément en $\Delta \mathbf{a}$, et en notant \mathbf{t} le vecteur obtenu par la concaténation des colonnes de T , il vient:

$$\Delta \mathbf{a} = (D^t D)^{-1} \cdot D^t \cdot (\mathbf{t} \otimes (\mathbf{s} - \hat{\mathbf{s}})) \quad (23)$$