

①9 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
—
**INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE**
—
COURBEVOIE
—

①1 N° de publication : **3 060 129**

(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

②1 N° d'enregistrement national : **16 62396**

⑤1 Int Cl⁸ : **G 01 R 31/08 (2017.01), G 06 F 19/00**

⑫

BREVET D'INVENTION

B1

⑤4 PROCÉDE DE CALCUL D'UN REFLECTOGRAMME POUR L'ANALYSE DE DEFAUTS DANS
UNE LIGNE DE TRANSMISSION.

②2 Date de dépôt : 14.12.16.

③0 Priorité :

④3 Date de mise à la disposition du public
de la demande : 15.06.18 Bulletin 18/24.

④5 Date de la mise à disposition du public du
brevet d'invention : 19.06.20 Bulletin 20/25.

⑤6 Liste des documents cités dans le rapport de
recherche :

Se reporter à la fin du présent fascicule

⑥0 Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

Demande(s) d'extension :

⑦1 Demandeur(s) : COMMISSARIAT A L'ENERGIE
ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES
Etablissement public — FR.

⑦2 Inventeur(s) : AUZANNEAU FABRICE.

⑦3 Titulaire(s) : COMMISSARIAT A L'ENERGIE
ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES
Etablissement public.

⑦4 Mandataire(s) : MARKS & CLERK FRANCE Société
en nom collectif.

FR 3 060 129 - B1



Procédé de calcul d'un réflectogramme pour l'analyse de défauts dans une ligne de transmission

L'invention concerne le domaine de l'analyse de défauts impactant
5 des lignes de transmission, tels que des câbles électriques.

Plus précisément, l'invention concerne le domaine particulier de la réflectométrie appliquée au diagnostic filaire qui englobe le domaine de la détection, la localisation et la caractérisation de défauts dans des lignes de transmission simples ou des réseaux filaires complexes.

10 Les méthodes de réflectométrie connues fonctionnent selon le procédé suivant. Un signal de référence maîtrisé, par exemple un signal impulsionnel ou encore un signal multi-porteuses, est injecté à une extrémité du câble à tester. Plus généralement, dans les méthodes modernes de réflectométrie, le signal de référence utilisé est choisi en fonction de ses
15 propriétés d'intercorrélation. Le signal se propage le long du câble et se réfléchit sur les singularités qu'il comporte.

Une singularité dans un câble correspond à une modification des conditions de propagation du signal dans ce câble. Elle résulte le plus souvent d'un défaut qui modifie localement l'impédance caractéristique du
20 câble en provoquant une discontinuité dans ses paramètres électriques linéiques.

Le signal réfléchi est rétro-propagé jusqu'au point d'injection, puis est analysé par le système de réflectométrie. Le retard entre le signal injecté et le signal réfléchi permet de localiser une (ou plusieurs) singularité(s),
25 correspondant à un défaut électrique, dans le câble. Un défaut peut résulter d'un court circuit, d'un circuit ouvert ou encore d'une dégradation locale du câble voire d'un simple pincement du câble.

Le traitement le plus important et également le plus coûteux en temps
30 de calcul dans un processus de réflectométrie concerne le calcul d'un réflectogramme qui est le résultat de l'intercorrélation entre une copie du

signal de test injecté dans le câble ou réseau de câbles et une mesure de ce même signal après sa propagation dans le câble ou réseau de câbles.

L'invention porte sur un procédé particulier de calcul d'un tel réflectogramme permettant de diminuer le temps de calcul nécessaire à son
5 exécution et ainsi diminuer sa complexité de mise en œuvre.

L'invention s'applique à tout type de câble électrique, en particulier des câbles de transmission d'énergie, dans des installations fixes ou mobiles. Les câbles concernés peuvent être coaxiaux, bifilaires, en lignes
parallèles, en paires torsadées ou autre.

10

Les câbles sont omniprésents dans tous les systèmes électriques, pour l'alimentation ou la transmission d'information. Ces câbles sont soumis aux mêmes contraintes que les systèmes qu'ils relient et peuvent être sujets à des défaillances. Il est donc nécessaire de pouvoir analyser leur état et
15 d'apporter des informations sur la détection de défauts, mais aussi leur localisation et leur type, afin d'aider à la maintenance.

Les méthodes de réflectométrie usuelles permettent ce type de tests. Elles utilisent des signaux de test ou référence, appelés aussi signaux de sonde ou signaux de réflectométrie. La forme de ces signaux change
20 significativement lors de leur propagation aller-retour dans un câble, ces changements étant la conséquence des phénomènes physiques d'atténuation et de dispersion.

Les méthodes de réflectométrie utilisent un principe proche de celui du radar: un signal électrique, le signal de sonde, souvent de haute
25 fréquence ou large bande, est injecté en un ou plusieurs endroits du câble ou du réseau de câbles à tester. Le signal se propage dans le câble ou le réseau et renvoie une partie de son énergie lorsqu'il rencontre une discontinuité électrique. Une discontinuité électrique peut résulter, par exemple, d'un branchement, de la fin du câble ou d'un défaut électrique à un
30 endroit quelconque du câble. L'analyse des signaux renvoyés au point d'injection permet d'en déduire des informations sur la présence et la

localisation de ces discontinuités, donc des défauts éventuels. Une analyse dans le domaine temporel ou fréquentiel est habituellement réalisée. Ces méthodes sont désignées par les acronymes TDR venant de l'expression anglo-saxonne « Time Domain Reflectometry » et FDR venant de
5 l'expression anglo-saxonne « Frequency Domain Reflectometry ». En particulier, les méthodes de réflectométrie temporelle TDR réalisent une analyse du signal mesuré en effectuant un calcul d'intercorrélation entre ce signal mesuré et le signal injecté pour plusieurs valeurs temporelles. Le résultat de ce calcul est appelé réflectogramme temporel. L'analyse des pics
10 d'amplitude du réflectogramme permet de caractériser la présence et la position de défauts éventuels dans le câble.

Le calcul d'un réflectogramme temporel nécessite donc d'exécuter une opération d'intercorrélation entre une copie du signal de test et une
15 mesure du signal propagé dans le câble à tester. Ce calcul est coûteux, en particulier pour des applications embarquées où les ressources de calcul sont limitées, car il consiste en une somme de produits.

Une solution connue permettant de rendre le calcul d'un réflectogramme moins coûteux à exécuter consiste à utiliser les propriétés
20 mathématiques de la transformée de Fourier. Le principe consiste à calculer le résultat d'intercorrélation comme la transformée de Fourier inverse du produit des transformées de Fourier des deux signaux. Ce type d'implémentation permet de diminuer la complexité de mise en œuvre en passant de l'ordre de K^2 opérations pour un calcul standard à $K \cdot \log_2(K)$
25 opérations pour le calcul par transformée de Fourier. K est le nombre d'échantillons de chaque signal ou encore la longueur de l'intercorrélation.

Cependant, le calcul par transformée de Fourier nécessite de connaître l'ensemble des K échantillons du signal mesuré et du signal de test avant de pouvoir exécuter le calcul. Il faut donc attendre d'avoir injecté les K
30 échantillons de signal et d'avoir mesuré les K échantillons du signal propagé dans le câble pour pouvoir calculer le réflectogramme.

En outre, il est souvent nécessaire de réaliser une moyenne de plusieurs réflectogrammes pour diminuer le bruit de mesure, donc en pratique il faut attendre une durée équivalente à $N \cdot K$ périodes du système d'injection et/ou du système de mesure, avec N le nombre de
5 réflectogrammes nécessaires au calcul de moyenne.

L'invention propose un procédé permettant de simplifier la mise en œuvre du calcul d'un réflectogramme et d'un réflectogramme moyenné, dans le cadre d'une méthode de réflectométrie temporelle. Ainsi, l'invention permet
10 d'accélérer le calcul d'un réflectogramme pour améliorer la vitesse de traitement.

L'invention présente notamment l'avantage de permettre une mise en œuvre d'une méthode de réflectométrie temporelle dans un dispositif embarqué dont les ressources de calcul sont limitées.

15

L'invention a pour objet un procédé, mise en œuvre par ordinateur, de calcul d'un réflectogramme associé à une ligne de transmission dans laquelle un signal de référence est préalablement injecté, un réflectogramme étant défini par un calcul à plusieurs instants successifs de l'intercorrélacion entre
20 le signal de référence injecté et une mesure du signal de référence après sa propagation dans la ligne de transmission, ledit procédé comprenant les étapes suivantes exécutées itérativement:

- Acquérir, à un instant courant $i+dK$, une mesure dudit signal après sa propagation dans la ligne de transmission, ladite mesure
25 comprenant un nombre dK d'échantillons,
- Déterminer un réflectogramme R_{i+dK} à l'instant courant $i+dK$, à partir d'un réflectogramme précédent R_i calculé à un instant précédent i , en effectuant les opérations suivantes pour chaque valeur du réflectogramme:
 - Retrancher au réflectogramme précédent R_i , au moins un
30 produit de corrélation entre un nombre dK d'échantillons du

signal mesurés à l'instant précédent i et un nombre dK d'échantillons correspondants du signal de référence injectés dans la ligne de transmission à un instant d'injection $i'-dK$,

- 5 * Ajouter au réflectogramme antérieur R_i , au moins un produit de corrélation entre un nombre dK d'échantillons mesurés à l'instant courant $i+dK$ et un nombre dK d'échantillons correspondants du signal de référence injectés dans la ligne de transmission à un instant d'injection i' .

10 Selon un aspect particulier de l'invention, à chaque itération, le nombre dK d'échantillons de signal injectés dans le câble et le nombre d'échantillons de signal mesuré est égal à un échantillon.

 Selon un aspect particulier de l'invention, le signal de référence est un signal chaotique.

15 Selon une variante particulière, le procédé selon l'invention comprend en outre une étape de calcul de la moyenne de plusieurs réflectogrammes calculés successivement, à des instants séparés d'un nombre d'échantillons inférieur au nombre d'échantillons K maximum sur lequel est calculée l'intercorrélation.

20 Selon un aspect particulier de cette variante, le nombre d'échantillons entre deux réflectogrammes successivement calculés est égal à quatre.

 Selon un aspect particulier de l'invention, un réflectogramme est calculé à partir d'un nombre d'échantillons de mesure du signal de référence après sa propagation dans la ligne de transmission égal à K et d'un nombre
25 d'échantillons de signal de référence injecté égal à $2K-1$.

 L'invention a également pour objet un procédé d'analyse d'une ligne de transmission comprenant les étapes du procédé de calcul d'un réflectogramme selon l'invention et une étape d'analyse du réflectogramme calculé pour identifier au moins un défaut sur la ligne de transmission.

Selon une variante de réalisation, le procédé d'analyse selon l'invention comprend une étape de génération et d'injection du signal de référence dans la ligne de transmission.

L'invention a encore pour objet un programme d'ordinateur
5 comportant des instructions pour l'exécution du procédé selon l'invention, lorsque le programme est exécuté par un processeur.

L'invention a encore pour objet un support d'enregistrement lisible par un processeur sur lequel est enregistré un programme comportant des instructions pour l'exécution du procédé selon l'invention, lorsque le
10 programme est exécuté par un processeur.

L'invention a encore pour objet un dispositif de calcul d'un réflectogramme associé à une ligne de transmission, comprenant des moyens de mesure d'un signal de propageant dans la ligne de transmission et des moyens de calcul conjointement configurés pour exécuter le procédé
15 selon l'invention.

L'invention a encore pour objet un système de diagnostic d'une ligne de transmission comprenant un dispositif d'injection d'un signal de référence dans la ligne de transmission et un dispositif de calcul d'un réflectogramme selon l'invention.
20

D'autres caractéristiques et avantages de la présente invention apparaîtront mieux à la lecture de la description qui suit en relation aux dessins annexés qui représentent :

- La figure 1a, un schéma d'un premier exemple d'un système de
25 réflectométrie configuré pour mettre en œuvre l'invention,
- La figure 1b, un schéma d'un second exemple d'un système de réflectométrie configuré pour mettre en œuvre l'invention,
- La figure 2, un schéma illustrant une comparaison du signal injecté en un point du câble et du signal mesuré en un point du câble à deux
30 instants successifs,

- La figure 3, un organigramme détaillant les étapes de mise en œuvre du procédé selon l'invention,
- Les figure 4a et 4b, deux schémas illustrant le fonctionnement de l'invention pour le calcul de deux réflectogrammes déterminés à deux instants successifs.

5

La figure 1a décrit un synoptique d'un exemple de système de réflectométrie configuré pour mettre en œuvre l'invention. L'invention se positionne dans le contexte des méthodes de réflectométrie pour détecter, localiser ou caractériser les défauts impactant un câble ou un réseau de câble.

Sur la figure 1a, on a représenté un câble à tester 104 qui présente un défaut 105 à une distance quelconque d'une extrémité du câble. Sans sortir du cadre de l'invention, le câble 104 peut être remplacé par un réseau de câbles complexes interconnectés entre eux. Le câble simple 104 de la figure 1a est représenté dans un but purement illustratif afin d'explicitier le principe général d'une méthode de réflectométrie.

Un système de réflectométrie 101 selon l'invention comprend un composant électronique 111 de type circuit intégré, tel un circuit à logique programmable, par exemple de type FPGA, ou micro-contrôleur, adapté à exécuter deux fonctions. D'une part, le composant 111 permet de générer un signal de réflectométrie $s(t)$ à injecter dans le câble 104 sous test. Ce signal généré numériquement est ensuite converti via un convertisseur numérique-analogique 112 puis injecté 102 à une extrémité du câble. Le signal $s(t)$ se propage dans le câble et est réfléchi sur la singularité engendrée par le défaut 105. Le signal réfléchi est rétropropagé jusqu'au point d'injection 106 puis capturé 103, converti numériquement via un convertisseur analogique-numérique 113, et transmis au composant 111. Le composant électronique 111 est en outre adapté à exécuter les étapes du procédé selon l'invention qui sera décrit ci-après pour, à partir du signal $s(t)$ reçu, déterminer un réflectogramme ou plusieurs réflectogrammes.

30

Le ou les réflectogramme(s) peuvent être transmis à une unité de traitement 114, de type ordinateur, assistant numérique personnel ou autre pour afficher les résultats des mesures sur une interface homme-machine.

Le système 101 décrit à la figure 1 est un exemple de réalisation
5 nullement limitatif. En particulier les deux fonctions exécutées par le composant 111 peuvent être séparées dans deux composants ou dispositifs distincts comme cela est illustré sur l'exemple de la figure 1b. Le point d'injection et le point de mesure du signal peuvent également être pris en des endroits quelconques du câble et non à son extrémité.

10 Sur la figure 1b, on a représenté un premier dispositif 101 dédié à la génération du signal de réflectométrie et à son injection dans le câble et un second dispositif 116 dédié à la mesure du signal en un point quelconque du câble puis au calcul du réflectogramme via un composant 115.

Le composant 115 peut être un composant électronique de type circuit
15 intégré, tel un circuit à logique programmable, par exemple de type FPGA ou un micro-contrôleur, par exemple un processeur de signal numérique, qui reçoit les mesures de signal et est configuré pour exécuter le procédé selon l'invention. Le composant 115 comporte au moins une mémoire pour sauvegarder les derniers échantillons de signal généré et injecté dans le
20 câble et les derniers échantillons de signal mesuré.

L'invention vise à proposer un nouveau calcul du réflectogramme qui permet de mieux répartir le grand nombre d'opérations à mettre en œuvre par le composant 115 pour rendre le calcul plus efficace.

25

La figure 3 schématise les principales étapes du procédé de calcul d'un réflectogramme selon l'invention.

Le procédé débute par une étape d'initialisation 300 qui comprend les sous-étapes suivantes :

- 30 - Génération et injection dans le câble de K premiers échantillons du signal de référence,

- Mesure de K échantillons du signal propagé dans le câble,
- Calcul initial du réflectogramme R_0 à partir de l'intercorrélacion entre les K échantillons du signal injecté et les K échantillons du signal mesuré.

5 L'étape d'initialisation 300 peut également être rendue optionnelle. Dans ce cas, le réflectogramme R_0 est initialisé à 0 puis, les étapes suivantes du procédé sont directement exécutées. Il faut alors attendre d'avoir mesuré K échantillons du signal propagé dans le câble pour obtenir un réflectogramme complet au profit d'un gain en temps de calcul dès le
10 démarrage du procédé.

Le nombre K est un paramètre de l'invention et correspond à la longueur (en nombre d'échantillons) de l'intercorrélacion réalisée entre le signal de référence et le signal mesuré pour calculer le réflectogramme.

15 La mesure du signal peut être réalisée simultanément à l'injection du signal dans le câble ou peut être réalisée avec un décalage temporel initial.

Dans le cas d'un dispositif de réflectométrie conforme à celui décrit à la figure 1b, pour lequel le dispositif de mesure 116 est distinct du dispositif d'injection 101 du signal, le dispositif de mesure 116 comprend un générateur du signal de référence qui a pour rôle de générer une copie du
20 signal de référence injecté dans le câble par le dispositif d'injection 101. Cette copie est utilisée pour calculer le réflectogramme.

L'étape d'initialisation 300 produit un premier réflectogramme, initial, noté R_0 .

25 Le procédé selon l'invention se poursuit par l'exécution itérative des étapes 301,302,303.

Les deux étapes 301,302 du procédé consistent à générer et injecter 301 dans le câble, itérativement, dK échantillons du signal de référence puis à mesurer 302 dK échantillons du signal propagé dans le câble. Le nombre
30 dK est un paramètre de l'invention et est préférablement choisi très inférieur à la valeur de K. La valeur de dK est au moins égale à 1.

Les étapes 301 et 302 sont exécutées itérativement, autrement dit, à chaque instant i , on injecte dK échantillons de signal dans le câble et on mesure dK échantillons de signal propagé. L'injection et la mesure du signal
 5 sont faites en continu pendant toute la durée de l'analyse du câble.

Dans le cas d'un dispositif de réflectométrie conforme à celui décrit à la figure 1b, à chaque itération, une copie des dK échantillons de signal injectés dans le câble sont générés par le dispositif 116 pour être utilisés pour le calcul de réflectogramme.

10 A chaque instant i , correspondant à une itération, les K derniers échantillons du signal injecté et les K derniers échantillons du signal mesuré sont sauvegardés dans un buffer ou une mémoire locale en vue de réaliser un calcul d'intercorrélation sur une durée correspondant aux K derniers échantillons. On rappelle que la valeur de dK est supposée très inférieure à
 15 la valeur K . On suppose que le signal mesuré a été préalablement numérisé pour conserver des échantillons numériques.

La figure 2 illustre une représentation du buffer contenant les K derniers échantillons du signal de référence d'une part et du signal mesuré
 20 d'autre part, à deux instants successifs i et $i+dK$. Entre ces deux instants successifs, un nombre dK de nouveaux échantillons de signal sont injectés dans le câble et le même nombre dK de nouveaux échantillons de signal sont mesurés.

Sur le haut de la figure 2, on a représenté le buffer $S_{c,i}$ contenant les
 25 échantillons du signal de référence sauvegardés à l'instant i et le buffer $S_{c,i+dK}$ contenant les échantillons du signal de référence sauvegardés à l'instant suivant $i+dK$.

Les dK échantillons du buffer $S_{c,i}$ les plus anciens (notés ECH-A sur la figure 2) sont supprimés du buffer $S_{c,i+dK}$ à l'instant suivant $i+dK$. Les $K-dK$
 30 échantillons du buffer $S_{c,i}$ les plus récents (notés ECH-C sur la figure 2) sont décalés dans le buffer $S_{c,i+dK}$ à l'instant suivant $i+dK$. Enfin, le buffer $S_{c,i+dK}$

contient dK nouveaux échantillons (notés ECH-N sur la figure 2) à l'instant suivant $i+dK$.

Sur le bas de la figure 2, on a représenté, de la même façon, le buffer S_i contenant les échantillons du signal mesuré, sauvegardés à l'instant i et le
5 buffer S_{i+dK} contenant les échantillons du signal mesuré, sauvegardés à l'instant suivant $i+dK$.

La figure 2 permet d'observer qu'à deux instants successifs i et $i+dK$, le buffer contenant les K derniers échantillons du signal de référence présente $K-dK$ valeurs identiques. De même à deux instants successifs i et
10 $i+dK$, le buffer contenant les K derniers échantillons du signal mesuré présente également $K-dK$ valeurs identiques.

Une valeur $R_i(n)$ du réflectogramme R_i à l'instant i correspond à l'inter-corrélation entre les échantillons du buffer $S_{c,i}$ contenant les K derniers
15 échantillons du signal de référence et les échantillons du buffer S_i contenant les K derniers échantillons du signal mesuré. Ce calcul est donné par la relation (1) ci-dessous.

$$R_i(n) = (S_c * S)_i(n) = \sum_{j=1}^{K-n+1} S_{c,i}(j) \cdot S_i(n+j-1) \quad (1)$$

20

L'indice n varie sur l'ensemble des valeurs temporelles pour lesquelles le réflectogramme R_i est calculé. La relation (1) donne donc une valeur du réflectogramme R_i pour un instant temporel d'indice n .

Pour générer un réflectogramme complet, il faut exécuter la relation
25 (1) en faisant varier l'indice n sur l'ensemble de l'intervalle temporel correspondant à la durée du réflectogramme. Ainsi l'indice n varie de 1 à K .

La valeur d'indice n du réflectogramme R_i calculé à l'instant i peut être décomposée en deux sommes, à partir de la relation (1) qui devient la
30 relation (2) :

$$R_i(n) = \sum_{j=1}^{dK} S_{c,i}(j) \cdot S_i(n+j-1) + \sum_{j=dK+1}^{K-n+1} S_{c,i}(j) \cdot S_i(n+j-1) \quad (2)$$

De la même façon, la valeur d'indice n du réflectogramme R_{i+dK} calculé à l'instant $i+dK$ peut être décomposée en deux sommes tel qu'illustré par la relation (3) :

$$\begin{aligned}
 & R_{i+dK}(n) \\
 5 \quad = & \sum_{j=1}^{K-n-dK+1} S_{c,i+dK}(j) \cdot S_{i+dK}(n+j-1) + \sum_{j=K-n-dK+2}^{K-n+1} S_{c,i+dK}(j) \cdot S_{i+dK}(n+j-1) \\
 & (3)
 \end{aligned}$$

D'après l'illustration de la figure 2, on sait que les valeurs ECH_C des échantillons du signal de référence S_c mémorisé à l'instant $i+dK$, allant des indices 1 à $K-dK$ sont identiques aux valeurs des échantillons du signal de référence S_c mémorisé à l'instant i , allant des indices $dK+1$ à K . La même conclusion s'applique pour le signal mesuré S .

A partir de ces constatations et des relations (2) et (3) on peut en déduire la relation de récurrence (4) entre une valeur du réflectogramme calculé à l'instant i et la même valeur d'indice n du réflectogramme calculé à l'instant suivant $i+dK$:

$$\begin{aligned}
 R_{i+dK}(n) = & R_i(n) \\
 & - \sum_{j=1}^{dK} S_{c,i}(j) \cdot S_i(n+j-1) \\
 & + \sum_{j=K-n-dK+2}^{K-n+1} S_{c,i+dK}(j) \cdot S_{i+dK}(n+j-1) \quad (4)
 \end{aligned}$$

Ainsi, les valeurs du réflectogramme à un instant $i+dK$ sont déterminées à partir des valeurs du réflectogramme à un instant i précédent à l'étape 303 du procédé selon l'invention.

L'étape 303 consiste ainsi à retrancher au réflectogramme précédent R_i , les produits de corrélation entre les dK échantillons du signal mesurés à l'instant précédent i et un nombre dK d'échantillons correspondants du signal de référence injectés dans la ligne de transmission à l'instant i , puis à ajouter au réflectogramme précédent R_i , les produits de corrélation entre les

dK nouveaux échantillons mesurés à l'instant courant $i+dK$ et un nombre dK d'échantillons correspondants du signal de référence injectés dans la ligne de transmission à l'instant courant $i+dK$.

Ainsi, le calcul du réflectogramme courant réalisé à l'étape 303
5 comprend un nombre d'opérations à effectuer sensiblement réduit. Un nombre d'opérations minimal est atteint pour une valeur de dK égale à 1 échantillon.

Les formules (1) à (4) sont données en considérant que l'instant
10 d'injection de nouveaux échantillons du signal de référence dans le câble et l'instant de mesure de nouveaux échantillons du signal propagé dans le câble sont identiques et correspondent à l'indice i . Sans perte de généralité, l'instant d'injection i' et l'instant de mesure i peuvent être différents, les relations (1) à (4) peuvent alors être réécrites en remplaçant i par i' dans les expressions du signal mesuré S . L'injection du signal et sa mesure doivent
15 cependant être synchronisées et fonctionner à un rythme d'échantillonnage identique.

Les étapes 301,302,303 sont itérées pendant une durée
correspondant à la durée d'analyse du câble.

20

L'étape 303 est exécutée pour toutes les valeurs d'un réflectogramme. Ainsi, le calcul explicité à la relation (4) est exécuté en parallèle pour n valeurs d'un réflectogramme, correspondant à n indices temporels successifs.

25

Les figures 4a et 4b illustrent ce calcul parallèle pour un réflectogramme comprenant 12 valeurs, une valeur de K égale à 12 échantillons de signal et une valeur de dK égale à 4 échantillons de signal.

Sur la figure 4a, on a représenté, pour chaque valeur d'indice n du
30 réflectogramme $R_i(n)$ à calculer à l'instant i , le buffer S_c comprenant les K

dernières valeurs du signal injecté et le buffer S contenant les K dernières valeurs du signal mesuré. L'indice n varie de 1 à K.

Sur la figure 4b, on a représenté les mêmes buffers S_c, S pour le calcul du réflectogramme à l'instant suivant $i+dK$.

5 Chaque valeur d'un réflectogramme est obtenue en réalisant l'intercorrélation entre les K échantillons du signal S mesuré, qui sont identiques pour chaque valeur n du réflectogramme, et un nombre variable d'échantillons du signal S_c de référence, ce nombre variant de 1 à K. Autrement dit, pour chaque valeur n du réflectogramme, on décale d'un
10 échantillon les échantillons dans le buffer du signal S_c de référence.

Les groupes d'échantillons en gras ECH_C_i et ECH_C_{i+dK} sur les deux figures 4a,4b correspondent aux échantillons de signal mesuré qui sont communs entre les instants i et $i+dK$. Autrement dit, il s'agit d'échantillons identiques en mémoire dans les buffers à ces deux instants successifs.

15 Les échantillons d'indice 9 à 12 (soit $K-dK+1$ à K) marqués ECH_N_{i+dK} dans les buffers à l'instant $i+dK$ correspondent aux dK nouveaux échantillons injectés dans le câble et mesurés.

Les échantillons d'indice 1 à 4 (soit 1 à dK) marqués ECH_A_i dans les buffers à l'instant i correspondent aux échantillons mémorisés à l'instant i qui
20 sont supprimés des buffers à l'instant $i+dK$.

Un exemple de réalisation particulier de l'invention concerne le cas où le nombre dK d'échantillons injectés puis mesurés à chaque instant i est égal à 1. Ce scénario est celui pour lequel le nombre d'opérations nécessaires à
25 chaque itération pour calculer un réflectogramme, est le plus faible.

Pour ce mode de réalisation particulier, l'étape 303 de calcul du réflectogramme peut être simplifiée à partir de l'équation (4) de la façon suivante.

A l'instant courant i, on retranche à chaque valeur indicée n du
30 réflectogramme $R_i(n)$, le produit $S(n)*S_c(1)$, puis on décale les échantillons dans les deux buffers S et S_c d'une valeur et on enregistre dans le buffer S_c

le nouvel échantillon du signal de référence injecté et dans le buffer S le nouvel échantillon du signal mesuré. Enfin, on ajoute à chaque valeur indiquée n du réflectogramme $R_i(n)$, le produit $S(K) \cdot S_c(K+1-n)$.

5 Dans une étape 304 optionnelle, les réflectogrammes calculés à l'étape 303 peuvent être moyennés afin de lutter contre l'influence du bruit qui impacte le signal mesuré.

La moyenne R_{moy}^n des réflectogrammes peut être réalisée, par exemple, en calculant itérativement une mise à jour de la moyenne courante
 10 R_{moy}^c par rapport à la moyenne précédente R_{moy}^a via la formule (5), où R_i est le dernier réflectogramme calculé :

$$R_{moy}^n = \frac{N_{moy} R_{moy}^a + R_i}{N_{moy} + 1} \quad (5)$$

$$N_{moy} = N_{moy} + 1$$

15

Dans une variante de réalisation, le buffer S_c qui permet de sauvegarder les derniers échantillons du signal de référence injecté dans le câble, et qui sont nécessaires pour le calcul d'un réflectogramme, peut être agrandi afin de sauvegarder à chaque instant non plus K échantillons mais
 20 $2K-1$. Dans ce cas, une valeur du réflectogramme est toujours calculée en réalisant l'intercorrélation entre K échantillons du buffer S comprenant le signal mesuré et K échantillons du buffer S_c comprenant le signal de référence injecté. Pour chaque valeur d'indice $i < n$ du réflectogramme, on décale les K échantillons sélectionnés pour le calcul d'un échantillon dans le
 25 buffer S_c .

Cette variante présente l'avantage d'améliorer la précision de calcul sur un réflectogramme du fait de la prise en compte d'une durée plus importante du signal de référence dans le calcul du réflectogramme. Ainsi, le calcul du réflectogramme selon cette variante permet de maintenir la

cohérence entre les multiples copies de signal injecté contenues dans le signal mesuré et le signal avec lequel ce dernier est corrélé.

Le principe de calcul du réflectogramme mis en œuvre à l'étape 303
5 reste similaire. A titre d'exemple, lorsque dK vaut 1, l'étape 303 peut être exécutée de la façon suivante.

A l'instant courant i , on retranche à chaque valeur indicée n du réflectogramme $R_i(n)$, le produit $S(1)*S_c(K+1-n)$, puis on décale les échantillons dans les deux buffers S et S_c d'une valeur et on enregistre dans
10 le buffer S_c le nouvel échantillon du signal de référence injecté et dans le buffer S le nouvel échantillon du signal mesuré. Enfin, on ajoute à chaque valeur indicée n du réflectogramme $R_i(n)$, le produit $S(K)*S_c(K+1-n)$.

L'invention s'applique avantageusement pour des signaux dits
15 chaotiques qui sont générés à l'aide d'une construction incrémentale. Autrement dit chaque échantillon S_n est généré à partir de l'échantillon précédent S_{n-1} : $S_n = f(S_{n-1})$.

Ce type de signal présente la particularité de permettre une injection du signal dans le câble au fil de l'eau pendant une durée importante sans
20 nécessité de sauvegarder une quantité importante d'échantillons.

Une propriété particulière des signaux chaotiques est que l'évolution d'un réflectogramme calculé pour ces signaux est telle que la contribution du bruit varie fortement sur une durée courte. Ainsi, il est possible de moyennner des réflectogrammes calculés à des instants rapprochés et donc de mettre
25 en œuvre un calcul de réflectogrammes du type décrit à la figure 3. Typiquement, l'écart entre deux réflectogrammes moyennés peut être supérieur ou égal à quatre périodes d'injections d'échantillons. Un avantage de l'invention appliquée à des signaux chaotiques est qu'elle permet de réaliser un calcul de réflectogramme moyen sur une durée plus courte que
30 les méthodes habituelles et ainsi de produire un résultat final plus rapidement.

L'invention présente également l'avantage de diminuer sensiblement l'influence du bruit sur les réflectogrammes calculés par rapport à une méthode basée sur l'emploi de transformées de Fourier.

5 Cet avantage peut être illustré par l'intermédiaire d'un exemple numérique. En considérant un horizon temporel correspondant à 1000 instants d'horloge (donc 1000 échantillons de signal généré, injectés dans le câble et mesurés après propagation dans le câble), et en fixant le nombre K d'échantillons utilisés pour calculer un réflectogramme à 100, une méthode
10 basée sur l'emploi de transformées de Fourier permet de calculer 10 réflectogrammes pendant cette durée et donc de faire diminuer le bruit d'un facteur $20 \cdot \log_{10}(10) = 20$ dB après moyennage.

Au contraire, l'invention permet dans la même durée de réaliser $900/4 = 225$ réflectogrammes (en prenant dK égal à 4) ce qui entraîne une
15 diminution du bruit sur le réflectogramme obtenu après moyennage d'un facteur $20 \cdot \log_{10}(225) = 47$ dB.

Ainsi, l'invention permet de lutter efficacement contre l'influence du bruit de mesure.

20 Le procédé selon l'invention peut être implémenté sur le composant 115 à partir d'éléments matériels et/ou logiciels.

Le procédé selon l'invention peut être implémenté directement par un processeur embarqué ou dans un dispositif spécifique. Le processeur peut être un processeur générique, un processeur spécifique, un circuit intégré
25 propre à une application (connu aussi sous le nom anglais d'ASIC pour « Application-Specific Integrated Circuit ») ou un réseau de portes programmables in situ (connu aussi sous le nom anglais de FPGA pour « Field-Programmable Gate Array »). Le dispositif selon l'invention peut utiliser un ou plusieurs circuits électroniques dédiés ou un circuit à usage
30 général. La technique de l'invention peut se réaliser sur une machine de calcul reprogrammable (un processeur ou un micro contrôleur par exemple)

exécutant un programme comprenant une séquence d'instructions, ou sur une machine de calcul dédiée (par exemple un ensemble de portes logiques comme un FPGA ou un ASIC, ou tout autre module matériel).

5 Le procédé selon l'invention peut également être mis en œuvre exclusivement en tant que programme d'ordinateur, le procédé étant alors appliqué à des mesures de signaux préalablement enregistrées. Dans un tel cas, l'invention peut être mise en œuvre en tant que programme d'ordinateur comportant des instructions pour son exécution. Le programme d'ordinateur
10 peut être enregistré sur un support d'enregistrement lisible par un processeur.

La référence à un programme d'ordinateur qui, lorsqu'il est exécuté, effectue l'une quelconque des fonctions décrites précédemment, ne se limite pas à un programme d'application s'exécutant sur un ordinateur hôte unique.
15 Au contraire, les termes programme d'ordinateur et logiciel sont utilisés ici dans un sens général pour faire référence à tout type de code informatique (par exemple, un logiciel d'application, un micro logiciel, un microcode, ou toute autre forme d'instruction d'ordinateur) qui peut être utilisé pour programmer un ou plusieurs processeurs pour mettre en œuvre des aspects
20 des techniques décrites ici. Les moyens ou ressources informatiques peuvent notamment être distribués ("*Cloud computing*"), éventuellement selon des technologies de pair-à-pair. Le code logiciel peut être exécuté sur n'importe quel processeur approprié (par exemple, un microprocesseur) ou cœur de processeur ou un ensemble de processeurs, qu'ils soient prévus
25 dans un dispositif de calcul unique ou répartis entre plusieurs dispositifs de calcul (par exemple tels qu'éventuellement accessibles dans l'environnement du dispositif). Le code exécutable de chaque programme permettant au dispositif programmable de mettre en œuvre les processus selon l'invention, peut être stocké, par exemple, dans le disque dur ou en mémoire morte. De
30 manière générale, le ou les programmes pourront être chargés dans un des moyens de stockage du dispositif avant d'être exécutés. L'unité centrale peut

commander et diriger l'exécution des instructions ou portions de code logiciel du ou des programmes selon l'invention, instructions qui sont stockées dans le disque dur ou dans la mémoire morte ou bien dans les autres éléments de stockage précités.

REVENDEICATIONS

1. Procédé, mise en œuvre par ordinateur, de calcul d'un réflectogramme
 5 associé à une ligne de transmission (104) dans laquelle un signal de
 référence est préalablement injecté, un réflectogramme étant défini par
 un calcul à plusieurs instants successifs de l'intercorrélation entre le
 signal de référence injecté et une mesure du signal de référence après sa
 10 propagation dans la ligne de transmission calculée sur un nombre
 d'échantillons maximum égal à K ledit procédé comprenant les étapes
 suivantes exécutées itérativement:
- Acquérir (302), à un instant courant $i+dK$, une mesure dudit signal
 après sa propagation dans la ligne de transmission, ladite mesure
 comprenant un nombre dK d'échantillons,
 - 15 - Déterminer (303) un réflectogramme R_{i+dK} à l'instant courant $i+dK$,
 à partir d'un réflectogramme précédent R_i calculé à un instant
 précédent i , en effectuant les opérations suivantes pour chaque
 valeur du réflectogramme:
 - Retrancher au réflectogramme précédent R_i , au moins un
 20 produit de corrélation entre un nombre dK d'échantillons du
 signal mesurés à l'instant précédent i et un nombre dK
 d'échantillons correspondants du signal de référence
 injectés dans la ligne de transmission à un instant d'injection
 $i'-dK$,
 - Ajouter au réflectogramme précédent R_i , au moins un
 25 produit de corrélation entre un nombre dK d'échantillons
 mesurés à l'instant courant $i+dK$ et un nombre dK
 d'échantillons correspondants du signal de référence
 injectés dans la ligne de transmission à un instant d'injection
 30 i' ,
 - dK étant strictement inférieur à K

2. Procédé de calcul d'un réflectogramme selon la revendication 1 dans lequel, à chaque itération, le nombre dK d'échantillons de signal injectés dans le câble et le nombre d'échantillons de signal mesuré est égal à un échantillon.
3. Procédé de calcul d'un réflectogramme selon l'une des revendications précédentes dans lequel le signal de référence est un signal chaotique.
4. Procédé de calcul d'un réflectogramme selon la revendication 3 comprenant en outre une étape (304) de calcul de la moyenne de plusieurs réflectogrammes calculés successivement, à des instants séparés d'un nombre d'échantillons inférieur au nombre d'échantillons K maximum sur lequel est calculée l'intercorrélacion.
5. Procédé de calcul d'un réflectogramme selon la revendication 4 dans lequel le nombre d'échantillons entre deux réflectogrammes successivement calculés est égal à quatre.
6. Procédé de calcul d'un réflectogramme selon l'une des revendications précédentes dans lequel un réflectogramme est calculé à partir d'un nombre d'échantillons de mesure du signal de référence après sa propagation dans la ligne de transmission égal à K et d'un nombre d'échantillons de signal de référence injecté égal à $2K-1$.
7. Procédé d'analyse d'une ligne de transmission comprenant les étapes du procédé de calcul d'un réflectogramme selon l'une des revendications précédentes et une étape d'analyse du réflectogramme calculé pour identifier au moins un défaut sur la ligne de transmission.
8. Procédé d'analyse d'une ligne de transmission selon la revendication 7 comprenant une étape de génération et d'injection (301) du signal de référence dans la ligne de transmission.

9. Programme d'ordinateur comportant des instructions pour l'exécution du procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, lorsque le programme est exécuté par un processeur.
- 5
10. Support d'enregistrement lisible par un processeur sur lequel est enregistré un programme comportant des instructions pour l'exécution du procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, lorsque le programme est exécuté par un processeur.
- 10
11. Dispositif (101,116) de calcul d'un réflectogramme associé à une ligne de transmission, comprenant des moyens de mesure (113) d'un signal de référence se propageant dans la ligne de transmission et des moyens de calcul (111,115) conjointement configurés pour exécuter le procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 7.
- 15
12. Système de diagnostic d'une ligne de transmission comprenant un dispositif (101) d'injection d'un signal de référence dans la ligne de transmission et un dispositif (116) de calcul d'un réflectogramme selon la revendication 11.
- 20

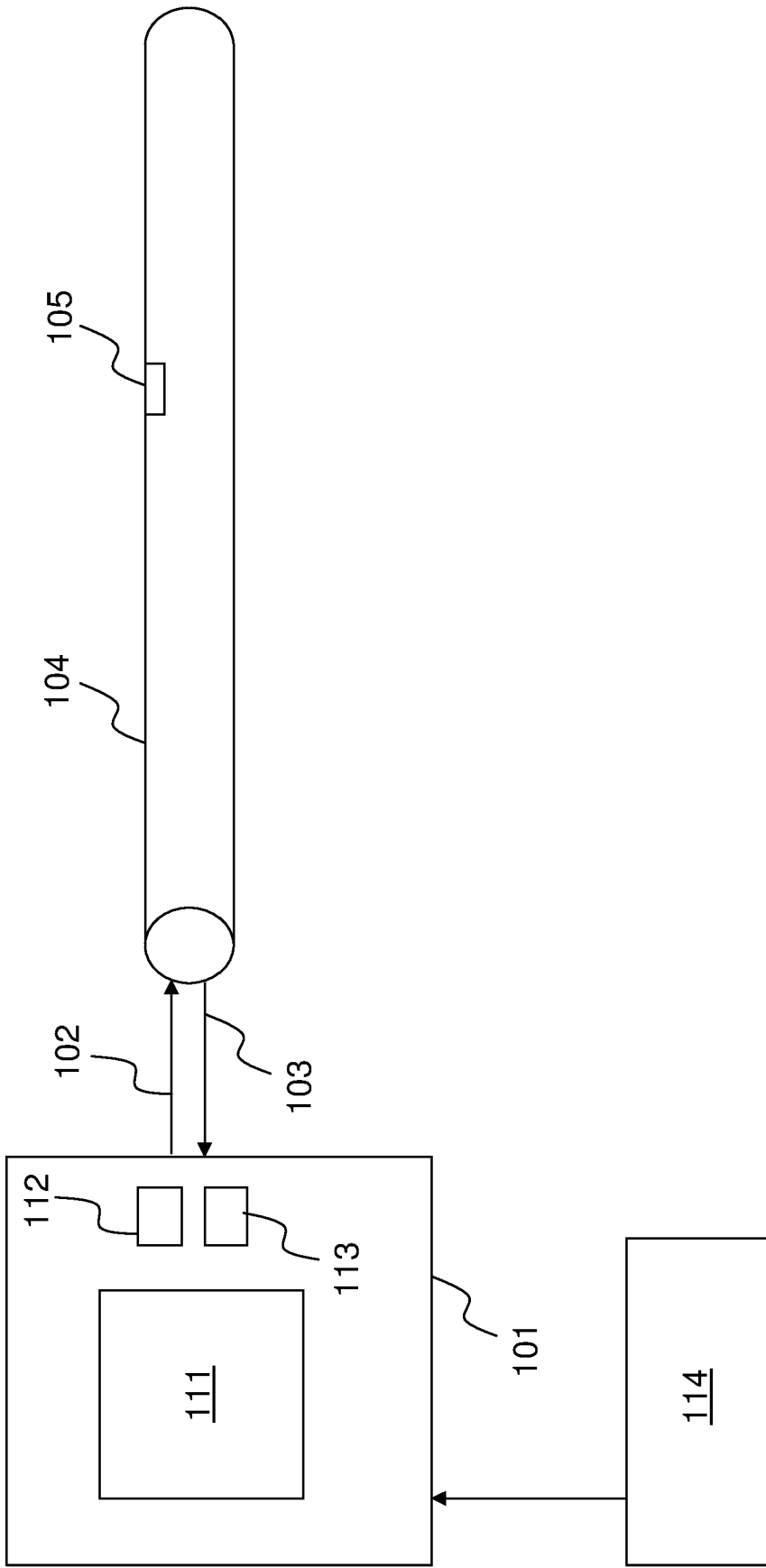


FIG.1a

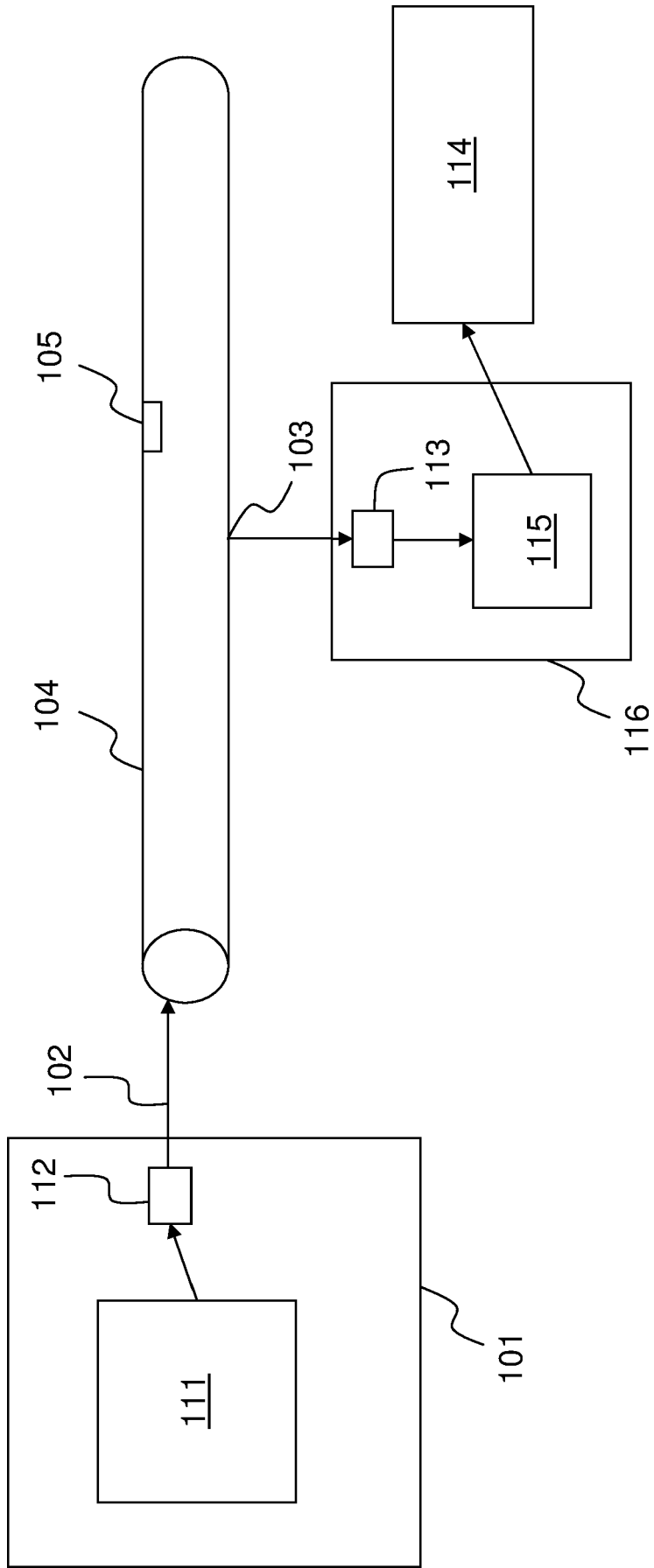


FIG.1b

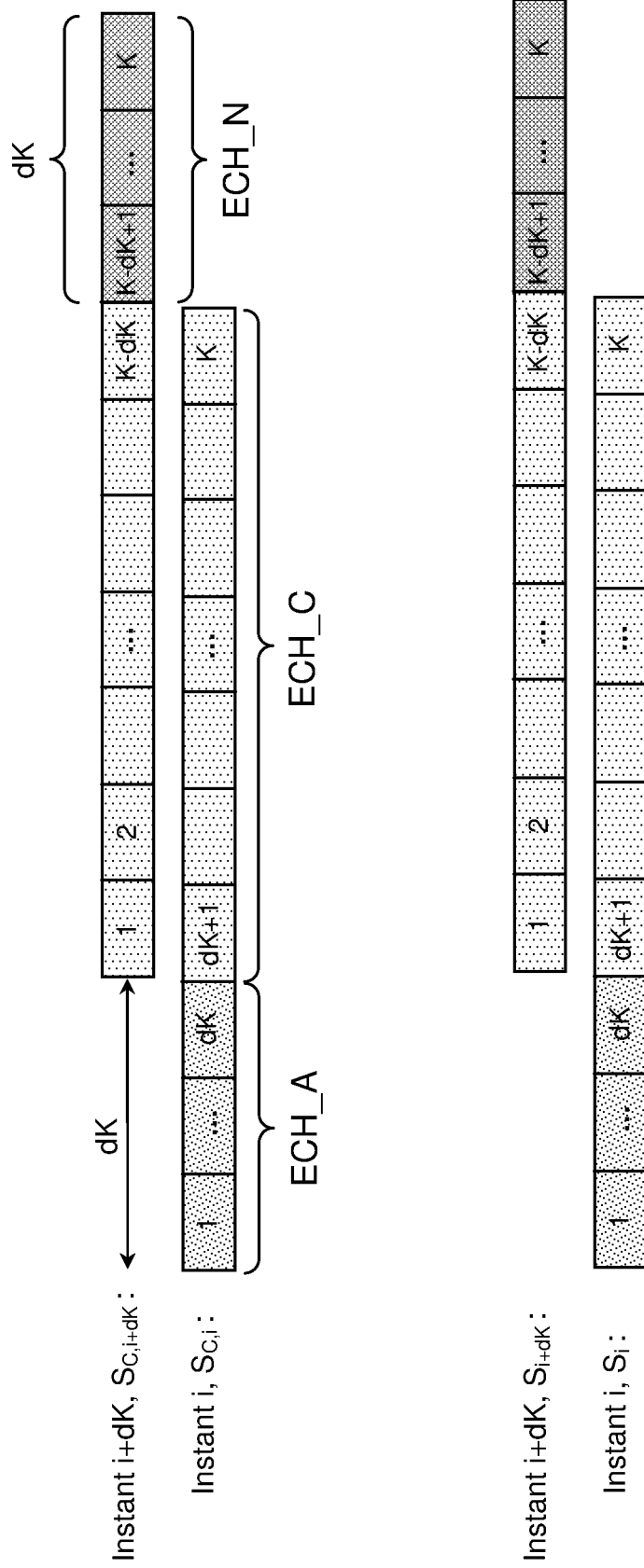


FIG.2

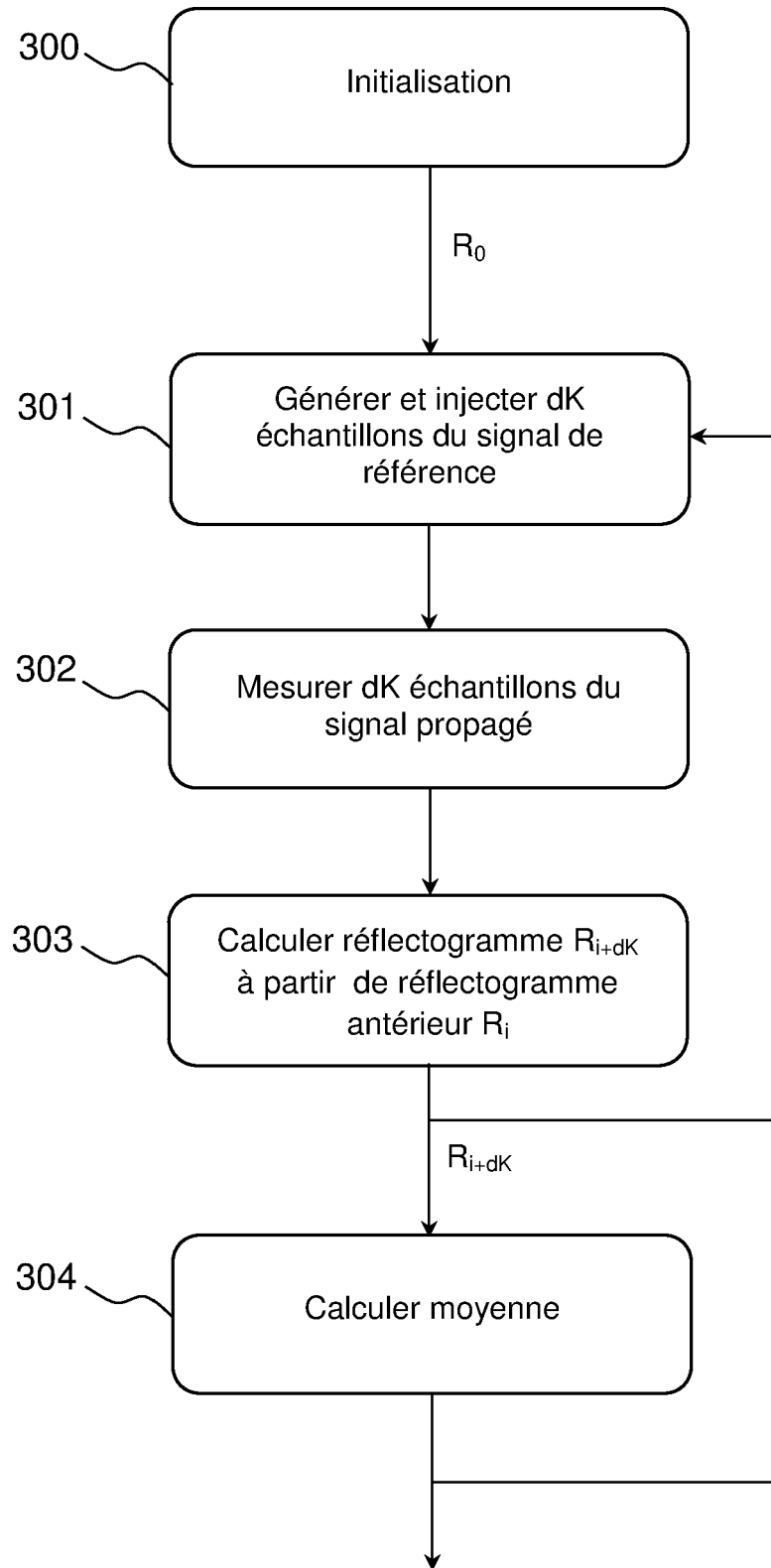


FIG.3

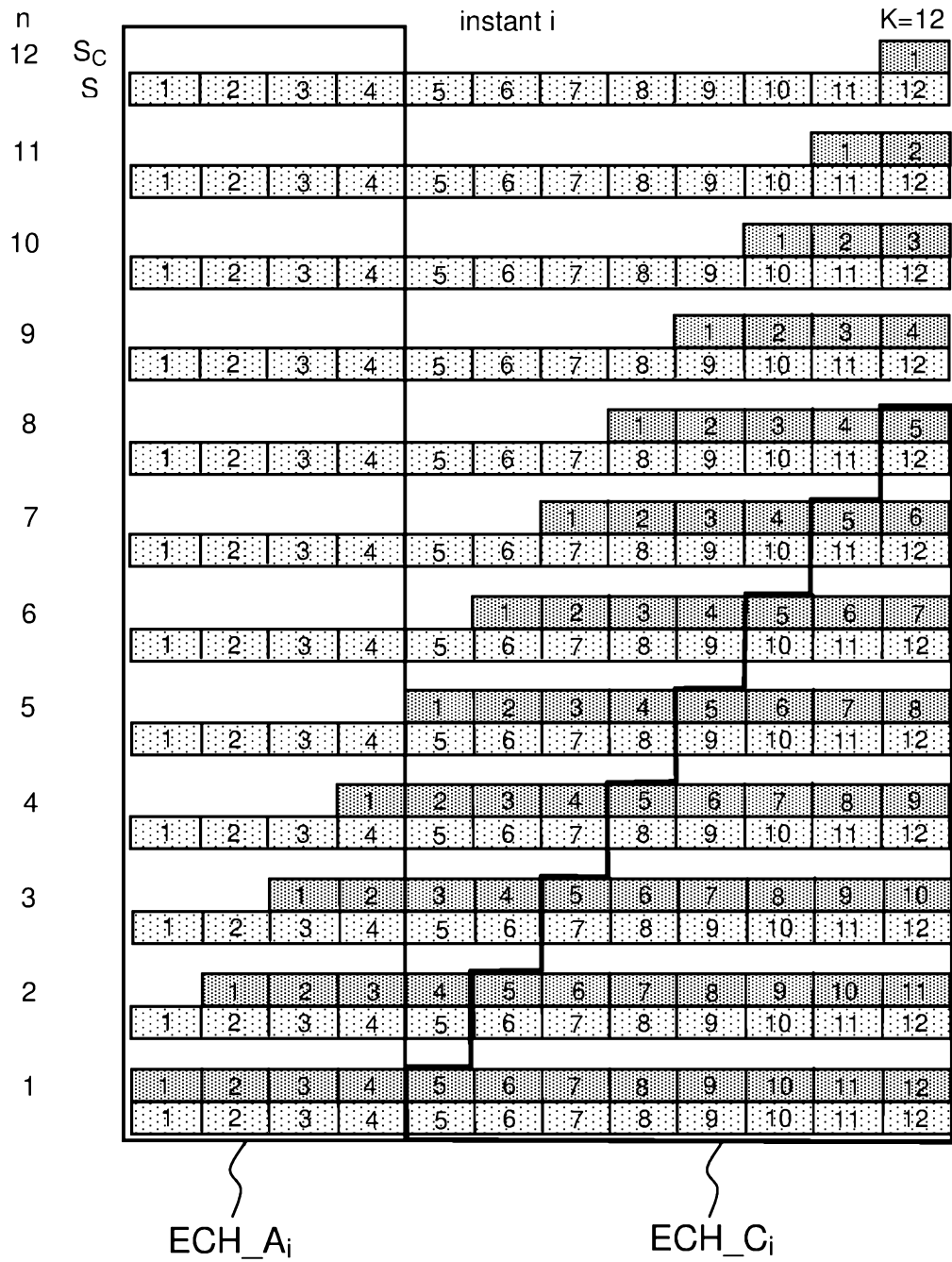


FIG.4a

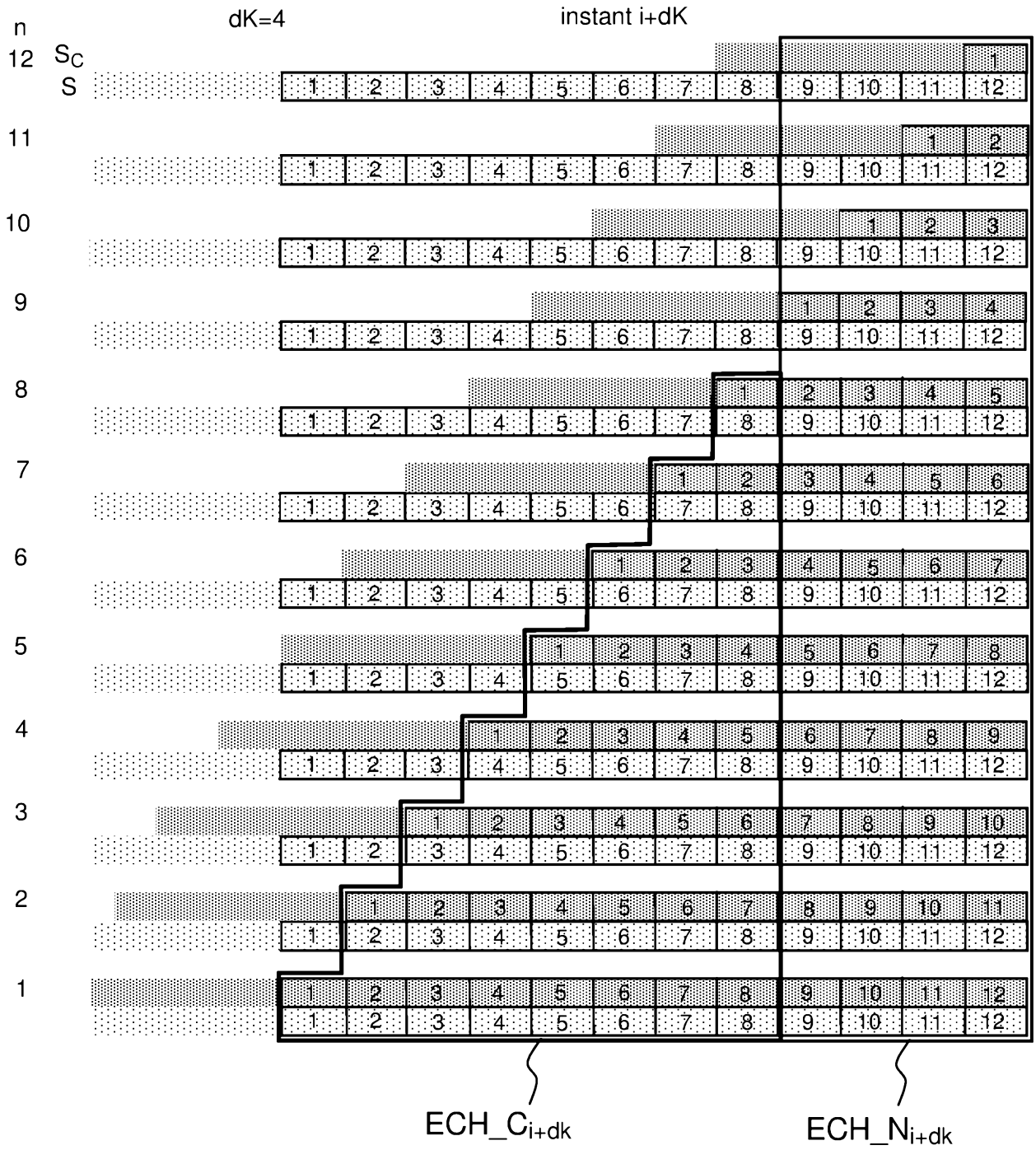


FIG.4b

RAPPORT DE RECHERCHE

articles L.612-14, L.612-53 à 69 du code de la propriété intellectuelle

OBJET DU RAPPORT DE RECHERCHE

L'I.N.P.I. annexe à chaque brevet un "RAPPORT DE RECHERCHE" citant les éléments de l'état de la technique qui peuvent être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention, au sens des articles L. 611-11 (nouveau) et L. 611-14 (activité inventive) du code de la propriété intellectuelle. Ce rapport porte sur les revendications du brevet qui définissent l'objet de l'invention et délimitent l'étendue de la protection.

Après délivrance, l'I.N.P.I. peut, à la requête de toute personne intéressée, formuler un "AVIS DOCUMENTAIRE" sur la base des documents cités dans ce rapport de recherche et de tout autre document que le requérant souhaite voir prendre en considération.

CONDITIONS D'ETABLISSEMENT DU PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

Le demandeur a présenté des observations en réponse au rapport de recherche préliminaire.

Le demandeur a maintenu les revendications.

Le demandeur a modifié les revendications.

Le demandeur a modifié la description pour en éliminer les éléments qui n'étaient plus en concordance avec les nouvelles revendications.

Les tiers ont présenté des observations après publication du rapport de recherche préliminaire.

Un rapport de recherche préliminaire complémentaire a été établi.

DOCUMENTS CITES DANS LE PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

La répartition des documents entre les rubriques 1, 2 et 3 tient compte, le cas échéant, des revendications déposées en dernier lieu et/ou des observations présentées.

Les documents énumérés à la rubrique 1 ci-après sont susceptibles d'être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention.

Les documents énumérés à la rubrique 2 ci-après illustrent l'arrière-plan technologique général.

Les documents énumérés à la rubrique 3 ci-après ont été cités en cours de procédure, mais leur pertinence dépend de la validité des priorités revendiquées.

Aucun document n'a été cité en cours de procédure.

1. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE SUSCEPTIBLES D'ETRE PRIS EN CONSIDERATION POUR APPRECIER LA BREVETABILITE DE L'INVENTION

FABRICE AUZANNEAU ET AL: "Chaos Time Domain Reflectometry for Online Defect Detection in Noisy Wired Networks", IEEE SENSORS JOURNAL., vol. 16, no. 22, 15 novembre 2016 (2016-11-15), pages 8027-8034, XP055405025, US ISSN: 1530-437X, DOI: 10.1109/JSEN.2016.2606567

AUZANNEAU F: "Chaos time-domain reflectometry for distributed diagnosis of complex topology wired networks", ELECTRONICS LET, IEE STEVENAGE, GB, vol. 52, no. 4, 18 février 2016 (2016-02-18), pages 280-281, XP006055384, ISSN: 0013-5194, DOI: 10.1049/EL.2015.3456

US 2016/266194 A1 (BEN HASSEN WAFA [FR] ET AL) 15 septembre 2016 (2016-09-15)

US 3 646 334 A (WOLD IVAR) 29 février 1972 (1972-02-29)

EP 1 209 817 A2 (NEC CORP [JP]) 29 mai 2002 (2002-05-29)

GB 1 341 603 A (COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE) 25 décembre 1973 (1973-12-25)

FR 2 248 759 A5 (COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE [FR]) 16 mai 1975 (1975-05-16)

EP 0 885 500 A1 (ERICSSON TELEFON AB L M [SE]) 23 décembre 1998 (1998-12-23)

2. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE ILLUSTRANT L'ARRIERE-PLAN TECHNOLOGIQUE GENERAL

NEANT

3. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE DONT LA PERTINENCE DEPEND DE LA VALIDITE DES PRIORITES

NEANT