(19) Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets

(11) **EP 3 346 632 A1**

(12) **DEMANDE DE BREVET EUROPEEN**

(43) Date de publication:
11.07.2018 Bulletin 2018/28

(51) Int Cl.:
H04L 9/06 *(2006.01)*

(21) Numéro de dépôt: **18305016.0**

(22) Date de dépôt: **10.01.2018**

(84) Etats contractants désignés:
AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR
Etats d'extension désignés:
BA ME
Etats de validation désignés:
MA MD TN

(30) Priorité: **10.01.2017 FR 1750215**

(71) Demandeur: **Idemia Identity & Security France**
92130 Issy-les-Moulineaux (FR)

(72) Inventeurs:
- **PROUFF, Emmanuel**
  92130 ISSY LES MOULINEAUX (FR)
- **LESCUYER DE CHAPTAL-LAMURE, Roch, Olivier**
  92130 ISSY LES MOULINEAUX (FR)
- **SERVANT, Victor**
  92130 ISSY LES MOULINEAUX (FR)

(74) Mandataire: **Regimbeau**
20, rue de Chazelles
75847 Paris Cedex 17 (FR)

(54) **PROCÉDÉ DE CHIFFREMENT OU DE DÉCHIFFREMENT D'UN N-UPLET DE DONNÉES AVEC UN N-UPLET DE CLÉS SECRÈTES PRÉDÉTERMINÉES**

(57) La présente invention concerne un procédé de chiffrement ou de déchiffrement d'un n-uplet de données

$$\left(\{a_i\}_{i\in[\![0,n-1]\!]}\right)$$

avec un n-uplet de clés secrètes

$$\left(\{k_i\}_{i\in[\![0,n-1]\!]}\right),$$

le procédé étant caractérisé en ce qu'il comprend la mise en oeuvre par des moyens de traitement de données (11a) d'un équipement (10a) d'étapes de :
(a) Pour chaque élément (a_i), détermination de $m > n$ premiers états internes

$$\left(\{y_{ij}\}_{j\in[\![0,m-1]\!]}\right)$$

par application de m premières opérations, chacune étant :
- représentée par une table (T_{ij}) stockée, et
- définie comme la combinaison d'un encodage interne bijectif (G_{ij}) unique, d'une fonction de partage non-linéaire (D_i, E_i, F_i ...), et d'une fonction non-linéaire de permutation (f) donnée paramétrée avec la clé secrète (k_i) correspondante ;

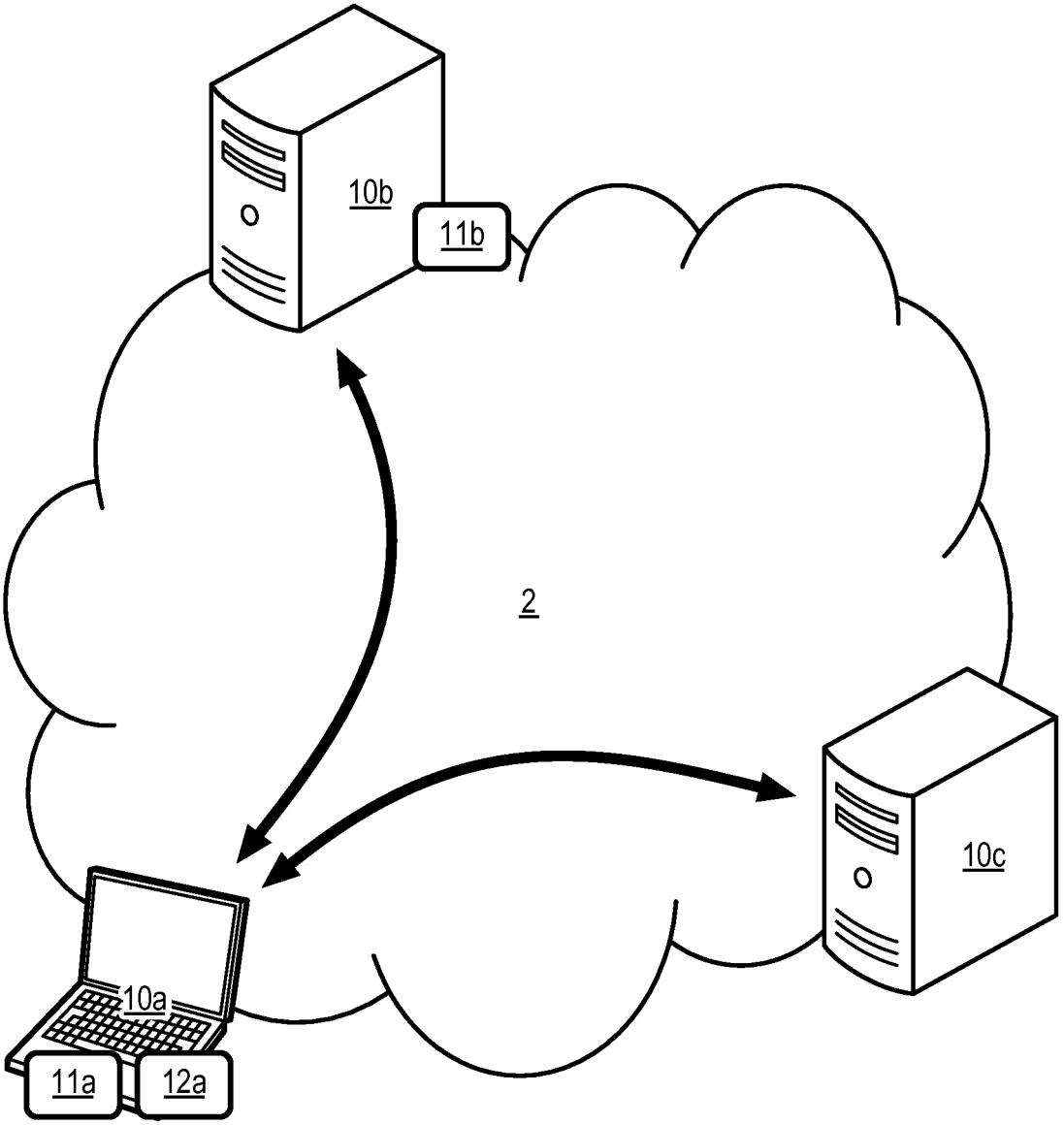
(b) Pour chaque n-uplet de premiers états internes

$$\left(\{y_{ij}\}_{i\in[\![0,n-1]\!]}\right),$$

EP 3 346 632 A1

détermination d'un deuxième état interne (z_j) par application d'une deuxième opération étant :
- représentée par une table (T_{Lj}) stockée, et
- définie comme la combinaison d'un deuxième encodage interne bijectif (G_{Lj}) unique, d'une fonction linéaire de multiplexage (L), et des inverses desdits premiers encodages internes bijectifs (G_{ij}).

FIG. 2



Description

DOMAINE TECHNIQUE GENERAL

[0001] La présente invention concerne le domaine de la cryptographie, et en particulier un procédé de chiffrement/déchiffrement de type « boite blanche ».

ETAT DE L'ART

[0002] Une fonction est considérée comme une « boîte noire » lorsqu'on ne peut pas accéder à son fonctionnement interne, i.e. qu'on peut connaître ses entrées et ses sorties mais pas ses paramètres secrets ou ses états intermédiaire.

[0003] Les algorithmes cryptographiques (par exemple pour du chiffrement ou de la signature) sont ainsi classiquement supposés des boites noires lorsqu'on évalue leur fiabilité (résistance aux attaques).

[0004] Par exemple, si l'on prend les algorithmes cryptographiques typiques tels que DES (« Data Encryption Standard ») ou AES (« Advanced Encryption Standard »), ceux-ci travaillent sur des blocs d'un taille 64 ou 128 bit (et demain 256 bit), mais ne peuvent en une seule opération traiter un tel bloc (il y a déjà plus de 10^{19} valeurs possibles de blocs de 64 bit). Il est ainsi nécessaire de travailler au sein d'un bloc sur des éléments plus petits, typiquement de taille 8 bit (seulement 256 possibilités) en enchainant des opérations non-linéaires (bijectives) avec des opérations linéaires (non injectives).

[0005] En référence à la **figure 1a** ces algorithmes peuvent s'illustrer de manière très simplifiée par la formule $a_0,a_1 \rightarrow L\,(f(a_0 + k_0), f(a_1 + k_1))$, où f désigne une opération non-linéaire par exemple sur 8 bits, L désigne une fonction linéaire (par exemple un XOR, « OU exclusif ») transformant dans l'exemple deux mots de 8 bits d'un bloc en un mot de 8 bits, a_0 et a_1 sont des octets de texte à chiffrer et k_0 et k_1 sont des données secrètes (les « clés » de l'algorithme). Ladite formule est appliquée itérativement de sorte à traiter tout le bloc.

[0006] L'hypothèse de boite noire suppose dans ce cas que les données k_0 et k_1 ou les états intermédiaires $f(a_0 + k_0)$ et $f(a_1 + k_1)$ sont inaccessibles.

[0007] Cette hypothèse impose une contrainte forte sur le stockage et la manipulation de ces paramètres. Cependant des outils ont été récemment publiés pour permettre l'automatisation d'attaques sur implémentation matérielle, attaques dites par canaux auxiliaires ou par fautes.

[0008] Aujourd'hui, pour de nombreux cas d'usages incluant le paiement sur mobile, il est nécessaire de déployer des algorithmes cryptographiques en faisant le moins d'hypothèses possibles sur la sécurité du matériel cible. Le stockage et la manipulation sécurisés des paramètres secrets doivent alors être assurés au niveau applicatif.

[0009] La cryptographie dite boite blanche vise à répondre à ce défi en proposant des implémentations des algorithmes cryptographiques qui sont sensés rendre l'extraction des secrets impossible, même en cas d'attaque permettant à l'attaquant un accès complet à l'implémentation logicielle de l'algorithme. Plus précisément, une fonction est considérée comme une « boîte blanche » lorsque ses mécanismes sont visibles et permettent d'en comprendre le fonctionnement. En d'autres termes, on fait directement l'hypothèse que l'attaquant a accès à tout ce qu'il souhaite (le binaire est complètement visible et modifiable par l'attaquant et celui-ci a le plein contrôle de la plateforme d'exécution). Par conséquent, l'implémentation elle-même est la seule ligne de défense.

[0010] Pour protéger l'implantation d'un schéma tel que décrit plus haut, il a d'abord été proposé de fusionner les clefs k_0 et k_1 avec la fonction f en représentant les calculs par des tables. Pour l'exemple étudié, cela revient en référence à la **figure 1b** à stocker en mémoire (e.g. ROM ou Flash) trois tables T_0, T_1 et T_L représentant respectivement les fonctions $a_0 \rightarrow T_0[a_0] = f(a_0 + k_0)$, $a_1 \rightarrow T_1[a_1] = f(a_1 + k_1)$ et $(y_0,y_1) \rightarrow T_L[y_0,y_1] = L(y_0,y_1) = z$.

[0011] Cette astuce permet d'éviter d'avoir les clés en clair, mais ne suffit pas à résister à une attaque consistant à tester exhaustivement toutes les clefs possibles k_0 (respectivement k_1) jusqu'à trouver celle qui vérifie $y_0 = f(a_0 + k_0)$ (respectivement $y_1 = f(a_1 + k_1)$).

[0012] Il a alors été proposé de « masquer » les états internes par des permutations aléatoires G_0, G_1, G_2 (inconnues mais constantes) appelées encodages internes. Plus précisément, comme représenté par la **figure 1c,** on obtient les états internes $G_0[y_0]$ et $G_1[y_1]$, à partir desquels on ne peut retrouver les clés en testant directement toutes les possibilités.

En utilisant la fonction linéaire $G_2\ o\ T_L\ o\ (G_0^{-1}, G_1^{-1}),$ on a bien $G_2\ o\ T_L\ o\ (G_0^{-1}\ o\ G_0[y_0], G_1^{-1}\ o\ G_1[y_1]) = G_2 \circ T_L[y_0, y_1] = G_2[z].$

[0013] Toutefois, des attaques ont montré que les schémas comme ci-dessus pouvaient encore être attaquées lorsque l'encodage était linéaire en exploitant la corrélation entre la donnée encodée et la donnée sensible (ie y_i ou z dans l'exemple ci-dessus), cf l'article « Differential Computation Analysis: Hiding Your White-Box Designs is Not Enough » à CHES2016.

[0014] Ce schéma est par ailleurs sensible à d'autres attaques dites *par collisions* qui exploitent le caractère non-injectif des transformations linéaires (ici T_L) pour construire des relations algébriques donnant de l'information sur la clef (la paire (k_0, k_1) dans l'exemple ci-dessus), cf l'article « Cryptanalysis of a White Box AES Implementation » publié à SAC2004.

[0015] Plus précisément, de faire du caractère non injectif de T_L on peut trouver des couples de paires (a_0, a_1) et (a_0', a_1') telles que $G_2 \circ T_L[f(a_0 + k_0), f(a_1 + k_1)] = G_2 \circ T_L[f(a_0' + k_0), f(a_1' + k_1)]$, i.e. $T_L[f(a_0 + k_1), f(a_1 + k_1)] = T_L[f(a_0' + k_0), f(a_1' + k_1)]$. On élimine ainsi les permutations aléatoires et si l'on a assez de couples on peut à nouveau tester exhaustivement les valeurs des clés k_0, k_1, ce qui est long mais faisable.

[0016] Il a par conséquent été proposé dans les demandes EP2924677, EP2922234 et EP2996278 un découpage des états internes en une somme de « fragments » (« splits » en anglais), de sorte à mettre en oeuvre la fonction non-linéaire fragment par fragment. On utilise pour cela une fonction linéaire de partage $D_i(y)$ permettant de fragmenter y, et on duplique les permutations aléatoires en G_{00}, G_{10}, G_{L0}, G_{01}, G_{11}, G_{L1} correspondant à l'un ou l'autre des fragments.

[0017] Toutefois, ce schéma reste sensible à certaines attaques, en particulier par collision : en posant pour que les calculs soient plus simples que T_L est la fonction OU exclusif, « XOR », ce qui n'enlève rien à la généralité de l'idée car toute fonction linéaire peut se décomposer en une succession de XORs et de produits scalaires avec des constantes, si pour z donné, on construit l'ensemble $\mathcal{P}_z$ des paires (x_0,x_1) telles que $z = G_{L0} \circ (D_0(y_0) + D_1(y_1))$, alors pour chaque paire $(x_0, x_1) \in \mathcal{P}_z$ on peut poser $D_0(y_0) + c_z = D_1(y_1)$, i.e. $y_1 = D_1^{-1}(D_0(y_0) + c_z)$.

[0018] Cela permet de construire la fonction $\varphi_{\hat{k}_0,\hat{k}_1}$: $\hat{y}_0 \rightarrow \hat{y}_1$ (où $\hat{y}_0$, $\hat{y}_1$ sont les paires associées à tous les $(x_0, x_1) \in \mathcal{P}_z$, pour toute paire de clés $\hat{k}_0,\hat{k}_1$), dont on peut montrer que le cas $(\hat{k}_0,\hat{k}_1) = (k_0,k_1)$ est distinguable, ce qui permet de remonter aux clés. En effet, dans le bon cas, la fonction $\varphi_{\hat{k}_0,\hat{k}_1}$ est une fonction linéaire (ou affine) alors qu'elle ne l'est pas lorsque $(\hat{k}_0,\hat{k}_1) \neq (k_0, k_1)$.

[0019] Il serait par conséquent souhaitable de disposer d'une nouvelle solution de chiffrement « boite blanche » utilisant les mécanismes standards comme le DES et l'AES qui soit complètement résistante à toutes attaques connues (par analyse de canaux, par collision etc.).

PRESENTATION DE L'INVENTION

[0020] Selon un premier aspect, la présente invention concerne un procédé de chiffrement ou de déchiffrement d'un n-uplet de données avec un n-uplet de clés secrètes prédéterminées, $n \geq 2$, pour une fonction non-linéaire de permutation et une fonction linéaire de multiplexage données, le procédé étant caractérisé en ce qu'il comprend la mise en oeuvre par des moyens de traitement de données d'un équipement d'étapes de :

(a) Pour chaque élément dudit n-uplet de données, détermination de $m > n$ premiers états internes par application audit élément de premières opérations, chacune étant :

- représentée par une table stockée sur des moyens de stockage de données de l'équipement, et
- définie comme la combinaison d'un encodage interne bijectif unique, d'une fonction de partage non-linéaire, et de la fonction non-linéaire de permutation paramétrée avec la clé secrète correspondante, lesdites fonctions de partage non-linéaires formant m collections telle que les n fonctions d'une collection partagent toute donnée d'entrée en n fragments dont la somme est égale à la donnée d'entrée ;
  l'ensemble desdits premiers états internes déterminés pour tous lesdits éléments formant n-uplets d'états internes ;

(b) Pour chaque n-uplet de premiers états internes, détermination d'un deuxième état interne par application auxdits états internes du n-uplet de premiers états internes d'une deuxième opération étant :

- représentée par une table stockée sur les moyens de stockage de données de l'équipement, et
- définie comme la combinaison d'un deuxième encodage interne bijectif unique, de la fonction linéaire de multiplexage, et des inverses desdits premiers encodages internes bijectifs.

[0021] Selon d'autres caractéristiques avantageuses et non limitatives :

- $\forall i \in [\![0,n-1]\!]$, $y_{i0} = T_{i0}[a_i] = G_{i0} \circ D_i \circ f(a_i + k_i)$, $y_{i1} = T_{i1}[a_i] = G_{i1} \circ E_i \circ f(a_i + k_i)$, $y_{i2} = T_{i2}[a_i] = G_{i2} \circ F_i \circ f(a_i + k_i)$, etc. ;
- $z_j = T_{Lj}[y_{0j}, y_{1j} \ldots] = G_{Lj} \circ L(G_{0j}{}^{-1}[y_{0j}], G_{1j}{}^{-1}[y_{1j}] \ldots)$;
- $\forall i \in [\![0,n-1]\!]$, $\forall x, x = D_i(x) + E_i(x) + F_i(x) + \cdots$;
- Le procédé comprend une étape préalable (a0) de génération aléatoire par des moyens de traitement de données d'un serveur connecté à l'équipement de *m* - 1 fonctions de partage non-linéaires pour chaque collection, à partir desquelles la m-ième fonction de partage non-linéaire est construite ;
- l'étape (a0) comprend en outre la génération aléatoire des encodages internes, la construction des tables, et leur transmission à l'équipement pour stockage sur les moyens de stockage ;
- la répétition des étapes (a) et (b) de sorte à chiffrer ou déchiffrer un ensemble de données comprenant celles dudit n-uplet ;
- le procédé comprend en outre une étape (c) de détermination du chiffré/déchiffré dudit n-uplet de données par application auxdits deuxièmes états internes d'une troisième opération étant :

  - représentée par une table stockée sur les moyens de stockage de données de l'équipement, et
  - définie comme la somme des inverses desdits deuxièmes encodages internes bijectifs.

- $$z = T_z\left[\left\{z_j\right\}_{j\in[\![0,m-1]\!]}\right] = \sum_{j=0}^{m-1} G_{Lj}{}^{-1}\left[z_j\right] \ ;$$

- n = 2 ;
- ladite fonction linéaire de multiplexage est la fonction OU exclusif ;
- m = 3 ;
- chaque élément dudit n-uplet de données a une taille d'un octet ou d'un semioctet ;
- ladite fonction non-linéaire de permutation est celle d'un algorithme cryptographique choisi parmi DES et AES.

[0022] Selon un deuxième et un troisième aspect, l'invention propose un produit programme d'ordinateur comprenant des instructions de code pour l'exécution d'un procédé selon le premier aspect de chiffrement ou de déchiffrement d'un n-uplet de données avec un n-uplet de clés secrètes prédéterminées ; et un moyen de stockage lisible par un équipement informatique sur lequel un produit programme d'ordinateur comprend des instructions de code pour l'exécution d'un procédé selon le premier aspect de chiffrement ou de déchiffrement d'un n-uplet de données avec un n-uplet de clés secrètes prédéterminées.

PRESENTATION DES FIGURES

[0023] D'autres caractéristiques et avantages de la présente invention apparaîtront à la lecture de la description qui va suivre d'un mode de réalisation préférentiel. Cette description sera donnée en référence aux dessins annexés dans lesquels :

- les figures 1a-1c illustrent trois algorithmes cryptographiques connus ;
- la figure 2 est un schéma d'une architecture pour la mise en oeuvre du procédé selon l'invention ;
- la figure 3 illustre un mode de réalisation d'un algorithme cryptographique conforme au procédé selon l'invention.

DESCRIPTION DETAILLEE

Architecture

[0024] En référence à la **figure 2,** est proposé un procédé de chiffrement ou de déchiffrement « boite blanche » mis en oeuvre au sein d'un équipement 10a tel qu'un terminal mobile (smartphone, tablette tactile, etc.), i.e. un équipement ne disposant pas particulièrement d'un matériel sécurisé et qui peut faire l'objet d'attaques sur implémentation matérielle, et pour lequel l'approche boite blanche prend tout son intérêt.

[0025] L'équipement 10a comprend des moyens de traitement de données 11a (un processeur) et des moyens de stockage de données 12a (une mémoire, par exemple flash).

[0026] L'équipement 10a est par exemple relié à un serveur 10b par exemple via le réseau internet 20. Il peut être

amené à recevoir depuis ce serveur 10b (par exemple celui d'un fournisseur de solutions de sécurité) des tables (qu'on décrira plus loin) contenant des secrets qui vont être stockées dans la mémoire 12a et utilisées pour la mise en oeuvre du présent procédé

[0027] L'équipement 10a peut lui-même être connecté à d'autres serveurs 10c de tiers avec lesquels il pourra échanger des données chiffrées au moyen de présent procédé.

Procédé cryptographique

[0028] Le présent procédé est un procédé cryptographique de « chiffrement ou de déchiffrement », cela signifie qu'il permet selon les cas de chiffrer des données ou d'en déchiffrer. Il est ainsi de type symétrique, ou « à clé secrète ».

[0029] On comprendra que le présent procédé est une nouvelle implémentation d'algorithmes connus, tels que DES ou AES qui sont les standards actuels. Plus précisément, il ne propose pas une nouvelle stratégie de chiffrement, mais seulement une nouvelle façon de manipuler les données au sein de l'algorithme qui soit résistante à toutes les attaques matérielles en « boite blanche ».

[0030] Selon un schéma classique, il traite les données blocs par bloc, et au sein d'un bloc il manipule des éléments d'une taille plus petite, par exemple 16 éléments d'un octet pour un bloc 128 bits (cas de AES par exemple). Ces éléments sont manipulés n par n, avec $n \geq 2$, et avantageusement $n = 2$.

[0031] Ainsi le présent procédé chiffre ou déchiffre un n-uplet de données

$$\{a_i\}_{i\in[\![0,n-1]\!]}$$

avec un n-uplet de clés secrètes

$$\{k_i\}_{i\in[\![0,n-1]\!]}$$

prédéterminées. Dans la suite de la description on fera l'hypothèse que $n = 2$ (i.e. on a une paire d'éléments a_0, a_1 et une paire de clés k_0, k_1), mais l'homme du métier saura transposer le procédé à d'autres valeurs de n supérieures.

[0032] Chaque élément a_i dudit n-uplet de données

$$\{a_i\}_{i\in[\![0,n-1]\!]}$$

est à valeur dans un espace $\{0;1\}^k$ qu'on notera $\mathbb{F}_2^k$ et a avantageusement une taille d'un octet (un « byte » de 8 bits, i.e. k = 8), mais on pourra par exemple prendre une taille d'un semioctet (un « nibble » de 4 bits, i.e. $k = 4$) ou encore 6 bits. On prendra l'exemple préféré d'un octet dans la suite de la description.

[0033] Pour traiter un bloc complet à partir d'éléments plus petits, il est nécessaire de multiplier les opérations au sein du bloc, et pour cela le présent procédé combine de façon classique l'utilisation d'une fonction non-linéaire de permutation f (étape (a) comme l'on verra), et l'utilisation d'une une fonction linéaire de multiplexage L (étape (b) comme l'on verra), chacune donnée en fonction de l'algorithme cryptographique à implémenter.

[0034] La fonction de permutation f est une fonction bijective paramétrée avec une clé secrète k_i qui prend en entrée un élément d'entrée de $\mathbb{F}_2^k$ et génère en sortie un élément de sortie de la même taille (i.e. de $\mathbb{F}_2^k$). Ces fonctions sont bien connues et on pourra en particulier utiliser celle de tout algorithme cryptographique utilisant des permutations, en particulier un algorithme choisi parmi DES et AES (la fonction f est alors par exemple une boite S).

[0035] Par fonction de « multiplexage », on entend une fonction prenant en entrée plusieurs éléments de $\mathbb{F}_2^k$ (en particulier n) et génèrant en sortie un seul élément de $\mathbb{F}_2^k$. Ainsi la fonction de multiplexage combine plusieurs éléments de $\mathbb{F}_2^k$. Ces fonctions sont bien connues et on pourra en particulier utiliser la fonction OU exclusif communément utilisée (en particulier dans AES), notée XOR et plus simplement +.

[0036] On comprendra que *f* est non-linéaire et que *L* est linéaire.

[0037] L'algorithme comprend typiquement l'alternance d'un étage d'utilisation de *f* pour permuter des éléments puis d'un étage d'utilisation de *L* pour fusionner les données, et ce jusqu'à avoir traité tout le bloc (les données fusionnées sont alors à nouveau permutées, puis fusionnées avec d'autres données, etc.). On comprend ainsi que le présent procédé comprend avantageusement la répétition des étapes (a) et (b) de sorte à chiffrer ou déchiffrer un ensemble de données comprenant celles dudit n-uplet

$$\{a_i\}_{i\in[\![0,n-1]\!]}.$$

[0038] Dans la suite de la présent description, on prendra l'exemple illustratif du schéma général $a_0,a_1 \rightarrow z = L(f(a_0 + k_0),f(a_1 + k_1))$ tel qu'on le trouve sur les figures 1a à 1c, mais l'homme du métier aura le transposer à d'autres structures algorithmiques.

[0039] A noter que pour des calculs plus complexes que ceux décrits dans les présents exemples, il peut être intéressant d'utiliser une décomposition sous la forme de séquences d'opérations linéaires et de multiplications. Dans ce cas, les idées continuent à s'appliquer en combinaison avec les travaux de Rivain-Prouff (« Provably Secure Higher-Order Masking of AES » CHES 2010) et Ishai-Sahai-Wagner (« Private Circuits: Securing Hardware against Probing Attacks » à CRYPTO 2003).

Etape de permutation

[0040] Le présent procédé est mis en oeuvre par les moyens de traitement de données 1 1a de l'équipement 10a.

[0041] Pour contrer les attaques de l'état de l'art, le présent procédé propose comme représenté sur la **figure 3** de partager tous les états internes du calcul en au moins $m > n$ parties (en particulier $n + 1$ parties), c'est-à-dire au moins 3 parties si $n = 2$ (on prendra l'exemple préféré de 3 parties dans la présente description) et à opérer les calculs sur ces parties de manière indépendante de façon à retrouver un partage du résultat final escompté en toute fin des calculs, avec des fonctions de partage non-linéaires. Ainsi et comme l'on verra plus loin, bien que l'art antérieur peut dissuader l'utilisation de fonctions de partage, la Demanderesse a découvert que le fait d'en utiliser suffisamment et de les choisir non-linéaires résout astucieusement toutes les failles.

[0042] Comme expliqué la première étape (a) est dite de permutation, elle voit l'utilisation de la fonction *f* mais pas de la fonction *L*.

[0043] Dans cette étape (a), pour chaque élément a_i dudit n-uplet de données

$$\{a_i\}_{i\in[\![0,n-1]\!]}$$

(i.e.

$$[\![0, n-1]\!]$$

), sont déterminés des « premiers états internes »

$$\{y_{ij}\}_{j\in[\![0,m-1]\!]}$$

(appartenant comme les éléments a_i à $\mathbb{F}_2^k$, et au nombre de *m*) par application audit élément a_i de *m* « premières opérations ». Les premiers états internes sont visibles dans l'hypothèse de boite blanche et doivent être donc inutilisables pour obtenir de l'information sur les clés secrètes.

[0044] Chaque première opération est pour cela :

- représentée par une table T_{ij} stockée sur des moyens de stockage de données 12a de l'équipement 10a (de sorte

à protéger l'implantation du schéma et cacher les clés), et

- définie comme la combinaison d'un encodage interne bijectif G_{ij} unique, d'une fonction de partage non-linéaire D_i, E_i, F_i ..., et de la fonction non-linéaire de permutation f paramétrée avec la clé secrète k_i correspondante, lesdites fonctions de partage non-linéaires D_i, E_i, F_i.. formant m collections

$$\{(D_i, E_i, F_i \dots)\}_{i\in[\![0,n-1]\!]}$$

telle que les n fonctions d'une collection partagent toute donnée d'entrée en n fragments dont la somme est égale à la donnée d'entrée.

[0045] On a donc typiquement :

$$y_{i0} = T_{i0}[a_i] = G_{i0} \circ D_i \circ f(a_i + k_i) = G_{i0} \circ D_i(y_i),$$

$$y_{i1} = T_{i1}[a_i] = G_{i1} \circ E_i \circ f(a_i + k_i) = G_{i1} \circ E_i(y_1),$$

$$y_{i2} = T_{i2}[a_i] = G_{i2} \circ F_i \circ f(a_i + k_i) = G_{i2} \circ F_i(y_i),$$

etc.

[0046] Plus précisément, l'idée de partage non-linéaire est de construire des fonctions D_i, E_i, F_i ... telles que

$$\forall i \in [\![0, n-1]\!],$$

$\forall x, x = D_i(x) + E_i(x) + F_i(x) + \cdots$. On prendra l'hypothèse que $m = 3$, c'est-à-dire que trois familles D_i, E_i, F_i suffisent, et donc 6 fonctions si $n = 2$. Les G_{ij} servent à l'encodage interne tandis que les D_i, E_i et F_i servent au partage de secret.

[0047] Ainsi, chaque valeur interne « non masquée » $y_i = f(a_i + k_i)$, qui est une donnée sensible, peut être reconstruite uniquement à partir de $D_i(y_i)$, $E_i(y_i)$ et $F_i(y_i)$.

[0048] E_i et F_i peuvent ainsi être choisies aléatoirement parmi toutes les fonctions (non nécessairement bijectives) opérant sur des éléments de la taille souhaitée, en particulier des octets, mais pas D_i, qui est liée aux autres.

[0049] Le procédé comprend ainsi préférentiellement une étape préalable (a0) de génération aléatoire par les moyens de traitement de données 11b d'un serveur 10b connecté à l'équipement 10a des m - 1 fonctions de partage non-linéaires E_i, F_i... pour chaque collection (D_i, E_i, F_i ...), à partir desquelles la *m-ième* fonction de partage non-linéaire D_i est construite (en posant par exemple $D_i(y) = y_i + E_i(y) + F_i(y) + \dots$ pour tout élément y). Tous les G_{ij} sont comme expliqués des encodages bijectifs (de $\mathbb{F}_2^k$ *dans* $\mathbb{F}_2^k$) de masquage, choisis aléatoirement une fois pour toute, en particulier par le serveur 10b.

[0050] Ainsi, de façon préférée, l'étape (a0) comprend en outre la génération aléatoire des encodages internes G_{ij} (et comme l'on va voir G_{Lj}), la construction des tables T_{ij}, (et comme l'on va voir T_{Lj}), et leur transmission à l'équipement 10a pour stockage sur les moyens de stockage 12a. Dans le mode de réalisation préféré on a $m \times n$ premiers encodages internes G_{ij} et leurs inverses, et m deuxièmes encodages internes G_{Lj} et leurs inverses. Au total, (m - 1) + ($m \times n$) + m = (n + 2)m - 1 fonctions de $\mathbb{F}_2^k$ dans $\mathbb{F}_2^k$ doivent être générées aléatoirement.

[0051] A l'issue de l'étape (a) (lorsqu'elle a été mise en oeuvre n fois pour tous les a_i), on dispose d'un ensemble (en l'espèce $m \times n$) desdits premiers états internes y_{ij}. On peut ainsi former m n-uplets de premiers états internes

$$\left\{\{y_{ij}\}_{i\in[\![0,n-1]\!]}\right\}_{j\in[\![0,m-1]\!]}.$$

Etape de multiplexage

[0052] La deuxième étape (b) est dite de multiplexage, elle voit l'utilisation de fonction L pour combiner les premiers états internes y_{ij}.

[0053] Dans cette étape (b), pour chaque n-uplet de premiers états internes

$$\{y_{ij}\}_{i\in[\![0,n-1]\!]}$$

(i.e.

$$\forall j \in [\![0, m-1]\!]$$

) est déterminé un (unique) « deuxième état interne » z_j (toujours dans $\mathbb{F}_2^k$) par application auxdits états internes y_{ij} du n-uplet de premiers états internes

$$\{y_{ij}\}_{i\in[\![0,n-1]\!]}$$

d'une « deuxième opération ».

[0054] Comme auparavant, les deuxièmes états internes sont visibles dans l'hypothèse de boite blanche et doivent être donc inutilisables pour obtenir de l'information sur les premiers états internes et les clés secrètes. Chaque deuxième opération est pour cela :

- représentée par une table T_{Lj} stockée sur les moyens de stockage de données 12a de l'équipement 10a (à nouveau de sorte à protéger l'implantation du schéma), et
- définie comme la combinaison d'un deuxième encodage interne bijectif G_{Lj} unique, de la fonction linéaire de multiplexage L, et des inverses desdits premiers encodages internes bijectifs G_{ij}.

[0055] On a donc typiquement :

$$z_j = T_{Lj}[y_{0j}, y_{1j} \ldots] = G_{Lj} \circ L\left({G_{0j}}^{-1}[y_{0j}], {G_{1j}}^{-1}[y_{1j}] \ldots\right).$$

[0056] On vient ainsi combiner *n* par *n,* de façon croisée comme l'on voit sur la figure 3, les premiers états internes de sorte à ce que la valeur non masquée de $z = T_L[y_0, y_1, \ldots]$ qui est une autre donnée sensible, peut être à nouveau reconstruite à partir de tous les $D_i(y_i)$, $E_i(y_i)$ et $F_i(y_i)$. Les G_{Lj} servent encore à l'encodage interne tandis que les D_i, E_i et F_i servent au partage de secret.

Explication

[0057] On peut alors aisément retrouver le chiffré/déchiffré *z* dudit n-uplet de données

$$\{a_i\}_{i\in[\![0,n-1]\!]}$$

à partir des m deuxièmes états internes

$$\{z_j\}_{j\in[\![0,m-1]\!]}.$$

[0058] Il suffit de leur appliquer si l'on souhaite dans une étape (c) une « troisième opération » qui est :

- représentée par une table T_z stockée sur les moyens de stockage de données 12a de l'équipement 10a, et
- définie comme la somme des inverses desdits deuxièmes encodages internes bijectifs G_{Lj}.

$$z = T_z\left[\{z_j\}_{j\in[\![0,m-1]\!]}\right] = \sum_{j=0}^{m-1} {G_{Lj}}^{-1}[z_j].$$

[0059] On a donc typiquement :

[0060] Or, comme $n < m$, chaque z_j ne contient pas assez d'information pour reconstruire obtenir une relation liant les y_i, une attaque par collision devient donc impossible.

[0061] Pour illustrer cela dans le cas $n = 2$ et $m = 3$, pour toute paire d'octets (a, b), on a $\forall j \in \{0; 1; 2\}$,

$$T_{Lj}(a,b) = G_{Lj}\left(L\left(G_{0j}^{-1}(a), G_{1j}^{-1}(b)\right)\right), \quad \text{c'est-à-dire} \quad T_{L0}(a,b) = G_{L0}\left(L\left(G_{00}^{-1}(a), G_{10}^{-1}(b)\right)\right),$$

$$T_{L1}(a,b) = G_{L1}\left(L\left(G_{01}^{-1}(a), G_{11}^{-1}(b)\right)\right) \text{ et } T_{L2}(a,b) = G_{L2}\left(L\left(G_{02}^{-1}(a), G_{12}^{-1}(b)\right)\right).$$

[0062] On peut vérifier que par linéarité de L et par construction, on a

$$T_{L0}(T_{00}[a_0], T_{10}[a_1]) = G_{L0}\left(L\left(G_{00}^{-1}(G_{00} o D_0[y_0]), G_{10}^{-1}(G_{10} o D_1[y_1])\right)\right) = G_{L0}\left(L(D_0[y_0], D_1[y_1])\right);$$

$$T_{L1}(T_{01}[a_0], T_{11}[a_1]) = G_{L1}\left(L\left(G_{01}^{-1}(G_{01} o E_0[y_0]), G_{11}^{-1}(G_{11} o E_1[y_1])\right)\right) = G_{L1}\left(L(E_0[y_0], E_1[y_1])\right);$$

$$T_{L2}(T_{02}[a_0], T_{12}[a_1]) = G_{L2}\left(L\left(G_{02}^{-1}(G_{02} o F_0[y_0]), G_{12}^{-1}(G_{12} o F_1[y_1])\right)\right) = G_{L2}\left(L(F_0[y_0], F_1[y_1])\right);$$

C'est-à-dire que $\forall j \in \{0; 1; 2\}$, $T_{Lj}(T_{0j}[a_0], T_{1j}[a_1]) = G_{Lj}(L({G_{0j}}^{-1}[y_{0j}], {G_{1j}}^{-1}[y_{1j}]))$. On en déduit que les G_{Lj} pour $j = 0,1,2$ forment un encodage d'un partage de la donnée $T_L[y_0,y_1]$ décrite dans la figure 1c.

[0063] Et

$$z = {G_{L0}}^{-1}[z_0] + {G_{L1}}^{-1}[z_1] + {G_{L2}}^{-1}[z_2] = {G_{L0}}^{-1} o G_{L0}\left(L(D_0[y_0], D_1[y_1])\right) + {G_{L1}}^{-1} o G_{L1}\left(L(E_0[y_0], E_1[y_1])\right) + {G_{L2}}^{-1} o G_{L2}\left(L(F_0[y_0], F_1[y_1])\right) = L(D_0[a_0], D_1[a_1]) + L(E_0[y_0], E_1[y_1]) + L(F_0[y_0], F_1[y_1]) = L(D_0[y_0] + E_0[y_0] + F_0[y_0], D_1[y_1] + E_1[y_1] + F_1[y_1]) = L(y_0, y_1) = L(f(x_0 + k_0), f(y_0 + k_1)).$$

[0064] Le présent découpage permet donc sans difficulté d'atteindre son objectif, à savoir permettre le chiffrement ou le déchiffrement d'éléments, tout en obtenant uniquement des états internes inexploitables pour retrouver les clés secrètes.

Produit programme d'ordinateur

[0065] Selon un deuxième et un troisième aspects, l'invention concerne un produit programme d'ordinateur comprenant des instructions de code pour l'exécution (en particulier sur les moyens de traitement de données 11a de l'équipement 10a) d'un procédé selon le premier aspect de l'invention de chiffrement ou de déchiffrement d'un n-uplet de données

$$\{a_i\}_{i\in[\![0,n-1]\!]}$$

avec un n-uplet de clés secrètes

$$\{k_i\}_{i\in[\![0,n-1]\!]}$$

prédéterminées, ainsi que des moyens de stockage lisibles par un équipement informatique (une mémoire 12a de l'équipement 10a) sur lequel on trouve ce produit programme d'ordinateur.

Revendications

1. Procédé de chiffrement ou de déchiffrement d'un n-uplet de données

$$\left(\{a_i\}_{i\in[\![0,n-1]\!]}\right)$$

avec un n-uplet de clés secrètes

$$\left(\{k_i\}_{i\in[\![0,n-1]\!]}\right)$$

prédéterminées, $n \geq 2$, pour une fonction non-linéaire de permutation (f) et une fonction linéaire de multiplexage (L) données, le procédé étant **caractérisé en ce qu'**il comprend la mise en oeuvre par des moyens de traitement de données (11a) d'un équipement (10a) d'étapes de :

(c) Pour chaque élément (a_i) dudit n-uplet de données

$$\left(\{a_i\}_{i\in[\![0,n-1]\!]}\right),$$

détermination de $m > n$ premiers états internes

$$\left(\{y_{ij}\}_{j\in[\![0,m-1]\!]}\right)$$

par application audit élément (a_i) de m premières opérations, chacune étant :

- représentée par une table (T_{ij}) stockée sur des moyens de stockage de données (12a) de l'équipement (10a), et
- définie comme la combinaison d'un encodage interne bijectif (G_{ij}) unique, d'une fonction de partage non-linéaire (D_i, E_i, F_i ...), et de la fonction non-linéaire de permutation (f) paramétrée avec la clé secrète (k_i) correspondante, lesdites fonctions de partage non-linéaires (D_i, E_i, F_i...) formant m collections

$$\left(\{(D_i, E_i, F_i \ldots)\}_{i\in[\![0,n-1]\!]}\right)$$

telle que les *n* fonctions d'une collection partagent toute donnée d'entrée en *n* fragments dont la somme est égale à la donnée d'entrée ;
l'ensemble desdits premiers états internes y_{ij} déterminés pour tous lesdits éléments (a_i) formant *m* n-uplets d'états internes

$$\left(\left\{\{y_{ij}\}_{i\in[\![0,n-1]\!]}\right\}_{j\in[\![0,m-1]\!]}\right);$$

(d) Pour chaque n-uplet de premiers états internes

$$\left(\{y_{ij}\}_{i\in[\![0,n-1]\!]}\right),$$

détermination d'un deuxième état interne (z_j) par application auxdits états internes (y_{ij}) du n-uplet de premiers états internes

$$\left(\{y_{ij}\}_{i\in[\![0,n-1]\!]}\right)$$

d'une deuxième opération étant :

- représentée par une table (T_{Lj}) stockée sur les moyens de stockage de données (12a) de l'équipement (10a), et
- définie comme la combinaison d'un deuxième encodage interne bijectif (G_{Lj}) unique, de la fonction linéaire de multiplexage (*L*), et des inverses desdits premiers encodages internes bijectifs (G_{ij}).

2. Procédé selon la revendication 1, dans lequel $\forall i \in$

$$[\![0, n-1]\!],$$

$y_{i0} = T_{i0}[a_i] = G_{i0} \circ D_i \circ f(a_i + k_i)$, $y_{i1} = T_{i1}[a_i] = G_{i1} \circ E_i \circ f(a_i + k_i)$, $y_{i2} = T_{i2}[a_i] = G_{i2} \circ F_i \circ f(a_i + k_i)$, etc.

3. Procédé selon la revendication 2, dans lequel $z_j = T_{Lj}[y_{0j}, y_{1j} \ldots] = G_{Lj} \circ L(G_{0j}^{-1}[y_{0j}], G_{1j}^{-1}[y_{1j}] \ldots)$.

4. Procédé selon l'une des revendications 1 à 3, dans lequel

$$\forall i \in [\![0, n-1]\!],$$

$\forall x, x = D_i(x) + E_i(x) + F_i(x) + \cdots$.

5. Procédé selon la revendication 4, comprenant une étape préalable (a0) de génération aléatoire par des moyens de traitement de données (11b) d'un serveur (10b) connecté à l'équipement (1a) de m - 1 fonctions de partage non-linéaires (E_i, F_i...) pour chaque collection (D_i, E_i, F_i ...), à partir desquelles la m-ième fonction de partage non-linéaire (D_i) est construite.

6. Procédé selon la revendication 5, dans lequel l'étape (a0) comprend en outre la génération aléatoire des encodages internes (G_{ij},G_{Lj}), la construction des tables (T_{ij},T_{Lj}), et leur transmission à l'équipement (10a) pour stockage sur les moyens de stockage (12a).

7. Procédé selon l'une des revendications 1 à 6, comprenant la répétition des étapes (a) et (b) de sorte à chiffrer ou déchiffrer un ensemble de données comprenant celles dudit n-uplet

$$\left(\{a_i\}_{i\in[\![0,n-1]\!]}\right).$$

8. Procédé selon l'une des revendications 1 à 7, comprenant en outre une étape (c) de détermination du chiffré/déchiffré (z) dudit n-uplet de données

$$\left(\{a_i\}_{i\in[\![0,n-1]\!]}\right)$$

par application auxdits deuxièmes états internes

$$\left(\{z_j\}_{j\in[\![0,m-1]\!]}\right)$$

d'une troisième opération étant :

- représentée par une table (T_z) stockée sur les moyens de stockage de données (12a) de l'équipement (10a), et
- définie comme la somme des inverses desdits deuxièmes encodages internes bijectifs (G_{Lj}).

9. Procédé selon la revendication 8, dans lequel z =

$$T_z\left[\{z_j\}_{j\in[\![0,m-1]\!]}\right] = \sum_{j=0}^{m-1} {G_{Lj}}^{-1}[z_j].$$

10. Procédé selon l'une des revendication 1 à 9, dans lequel n = 2.

11. Procédé selon la revendication 10, dans lequel ladite fonction linéaire de multiplexage (L) est la fonction OU exclusif.

12. Procédé selon l'une des revendications 1 à 11, dans lequel m = 3.

13. Procédé selon l'une des revendications 1 à 12, dans lequel chaque élément (a_i) dudit n-uplet de données

$$\left(\{a_i\}_{i\in[\![0,n-1]\!]}\right)$$

a une taille d'un octet ou d'un semioctet.

14. Procédé selon l'une des revendications 1 à 13, dans lequel ladite fonction non-linéaire de permutation (f) est celle d'un algorithme cryptographique choisi parmi DES et AES.

15. Produit programme d'ordinateur comprenant des instructions de code pour l'exécution d'un procédé selon l'une des revendications 1 à 14 de chiffrement ou de déchiffrement d'un n-uplet de données

$$\left(\{a_i\}_{i\in[\![0,n-1]\!]}\right)$$

avec un n-uplet de clés secrètes

$$\left(\{k_i\}_{i\in[\![0,n-1]\!]}\right)$$

prédéterminées.

16. Moyen de stockage lisible par un équipement informatique sur lequel un produit programme d'ordinateur comprend des instructions de code pour l'exécution d'un procédé selon l'une des revendications 1 à 14 de de chiffrement ou de déchiffrement d'un n-uplet de données

$$\left(\{a_i\}_{i\in[\![0,n-1]\!]}\right)$$

avec un n-uplet de clés secrètes

$$\left(\{k_i\}_{i\in[\![0,n-1]\!]}\right)$$

prédéterminées.

FIG. 1a

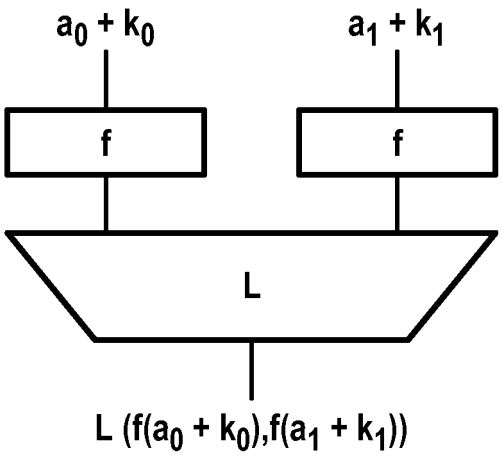


FIG. 1b

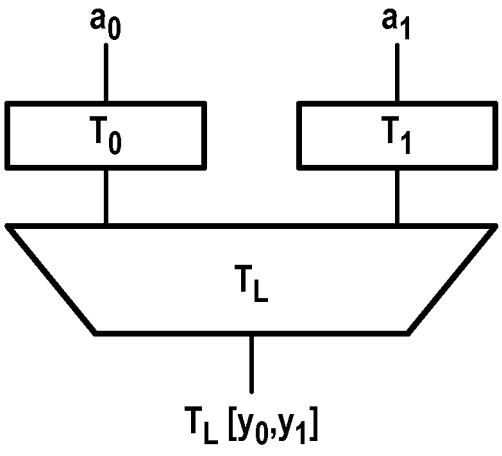


FIG. 1c

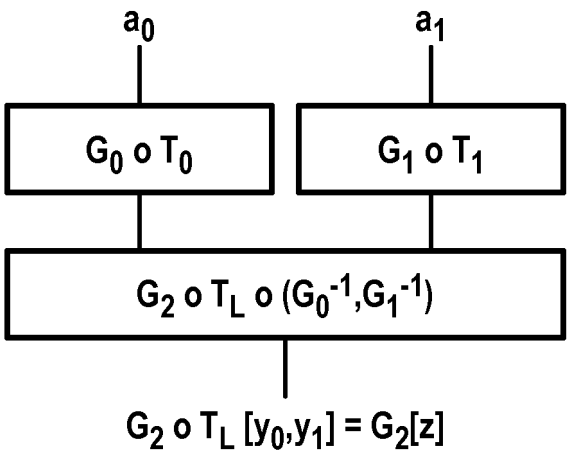


FIG. 2

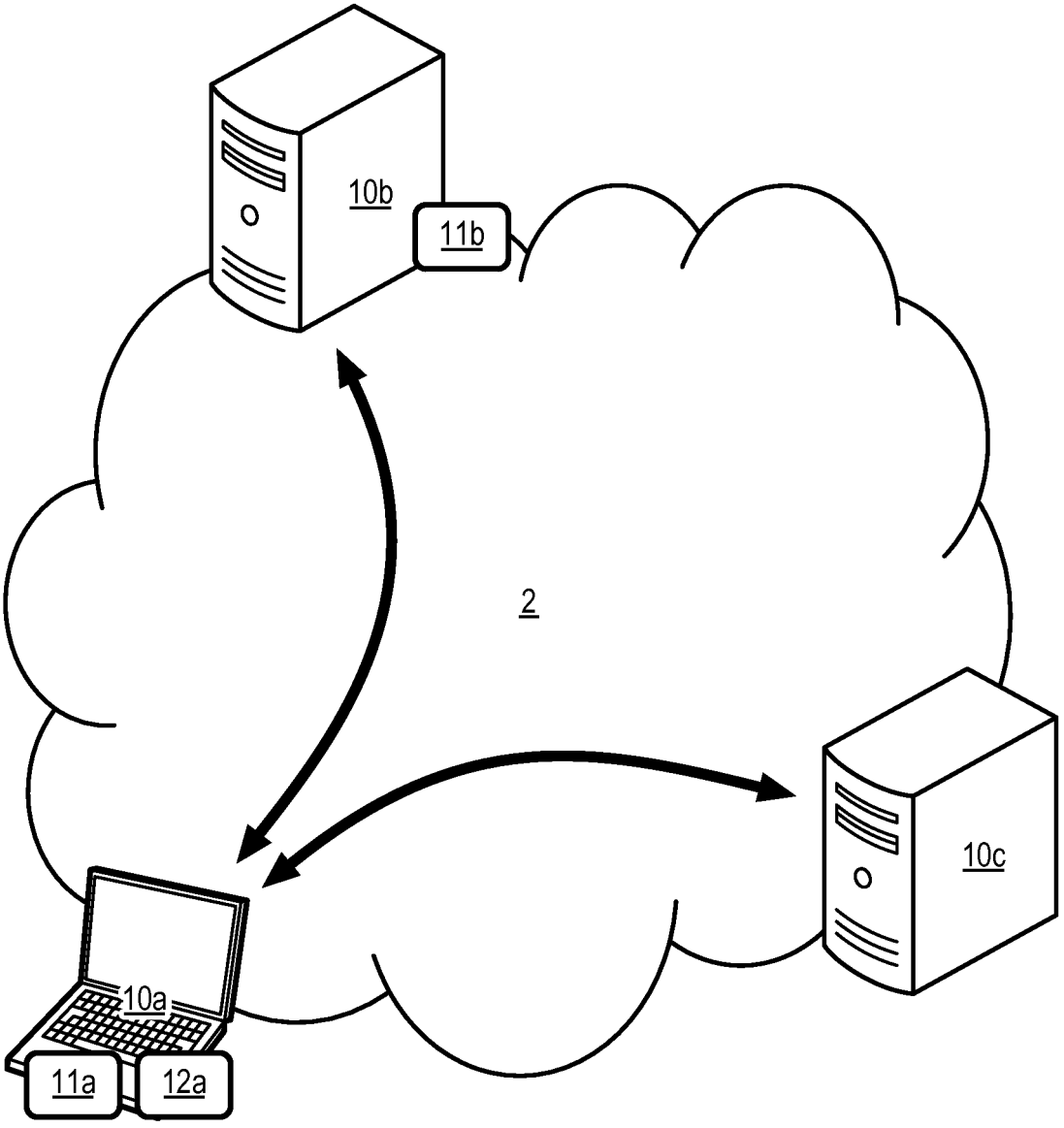
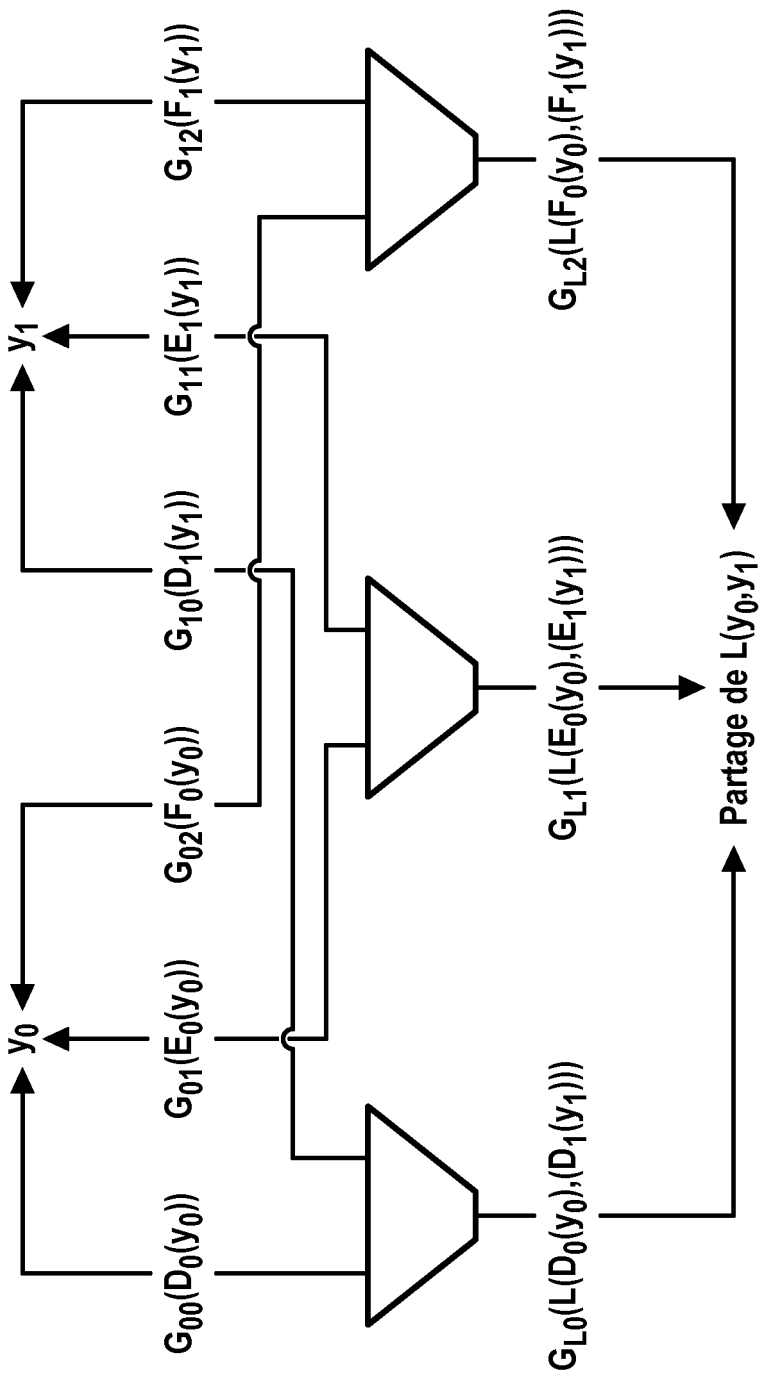


FIG. 3


y_1
y_0
$G_{12}(F_1(y_1))$
$G_{11}(E_1(y_1))$
$G_{10}(D_1(y_1))$
$G_{02}(F_0(y_0))$
$G_{01}(E_0(y_0))$
$G_{00}(D_0(y_0))$
$G_{L2}(L(F_0(y_0),(F_1(y_1))))$
$G_{L1}(L(E_0(y_0),(E_1(y_1))))$
$G_{L0}(L(D_0(y_0),(D_1(y_1))))$
Partage de $L(y_0,y_1)$

Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets

RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numéro de la demande
EP 18 30 5016

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	Revendication concernée	CLASSEMENT DE LA DEMANDE (IPC)
A	US 2012/045050 A1 (FARRUGIA AUGUSTIN J [US] ET AL) 23 février 2012 (2012-02-23) * abrégé * * colonnes 14-19 * -----	1-16	INV. H04L9/06
A	CHOW S ET AL: "Selected Areas in Cryptography, White-Box Cryptography and an AES Implementation", SELECTED AREAS IN CRYPTOGRAPHY : 9TH ANNUAL INTERNATIONAL WORKSHOP ; REVISED PAPERS / SAC 2002, ST. JOHN'S, NEWFOUNDLAND, CANADA, AUGUST 15 - 16, 2002; [LECTURE NOTES IN COMPUTER SCIENCE ; 2595], SPRINGER VERLAG, BERLIN (DE), vol. 2595, 15 août 2002 (2002-08-15), pages 250-270, XP002587883, ISBN: 978-3-540-00622-0 * abrégé * * Chapter 2: "White-Box Cryptography and Attack Context"; pages 253-255 * * Chapter 3: "Constructing White-Box AES Implementations"; pages 255-261 * -----	1-16	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (IPC) H04L
A	US 2010/299515 A1 (MICHIELS WILHELMUS PETRUS ADRIANUS JOHANNES [NL] ET AL) 25 novembre 2010 (2010-11-25) * abrégé * * alinéas [0005] - [0045] * -----	1-16	

Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications

Lieu de la recherche	Date d'achèvement de la recherche	Examinateur
Munich	25 avril 2018	Di Felice, M

CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES

X : particulièrement pertinent à lui seul
Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie
A : arrière-plan technologique
O : divulgation non-écrite
P : document intercalaire

T : théorie ou principe à la base de l'invention
E : document de brevet antérieur, mais publié à la date de dépôt ou après cette date
D : cité dans la demande
L : cité pour d'autres raisons
.....
& : membre de la même famille, document correspondant

EPO FORM 1503 03.82 (P04C02)

ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET EUROPEEN NO. EP 18 30 5016

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche européenne visé ci-dessus.
Lesdits members sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du
Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets.

25-04-2018

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 2012045050 A1	23-02-2012	AU 2011292312 A1	14-03-2013
		BR 112013004010 A2	28-06-2016
		CA 2807636 A1	23-02-2012
		CN 103119888 A	22-05-2013
		DE 112011102765 T5	19-09-2013
		EP 2606603 A1	26-06-2013
		KR 20130041353 A	24-04-2013
		SE 1350203 A1	20-05-2013
		US 2012045050 A1	23-02-2012
		WO 2012024086 A1	23-02-2012
US 2010299515 A1	25-11-2010	CN 101578813 A	11-11-2009
		EP 2104987 A2	30-09-2009
		JP 2010515945 A	13-05-2010
		US 2010299515 A1	25-11-2010
		WO 2008084433 A2	17-07-2008

EPO FORM P0460

Pour tout renseignement concernant cette annexe : voir Journal Officiel de l'Office européen des brevets, No.12/82

RÉFÉRENCES CITÉES DANS LA DESCRIPTION

Cette liste de références citées par le demandeur vise uniquement à aider le lecteur et ne fait pas partie du document de brevet européen. Même si le plus grand soin a été accordé à sa conception, des erreurs ou des omissions ne peuvent être exclues et l'OEB décline toute responsabilité à cet égard.

Documents brevets cités dans la description

- EP 2924677 A **[0016]**
- EP 2922234 A **[0016]**
- EP 2996278 A **[0016]**

Littérature non-brevet citée dans la description

- **RIVAIN-PROUFF.** Provably Secure Higher-Order Masking of AES. CHES, 2010 **[0039]**
- **ISHAI-SAHAI-WAGNER.** Private Circuits: Securing Hardware against Probing Attacks. CRYPTO, 2003 **[0039]**