Modèles discrets pour la sécurité informatique : des méthodes itératives à l'analyse vectorielle.

Jean-François COUCHOT

Soutenance d'HDR : le 30/01/16

Rapporteurs :

Olivier BOURNEZ	Professeur à l'Ecole Polytechnique.
Jean-Paul COMET	Professeur à l'Université de Nice Sophia Antipolis
Juan-Pablo ORTEGA	Professeur à l'Université de St. Gallen–Suisse

Examinateurs :

Sylvain CONTASSOT-VIVIER	Professeur à l'Université de Lorraine
Raphaël COUTURIER	Professeur à l'Univ. Bourgogne Franche-Comté
Christophe GUYEUX	Professeur à l'Univ. Bourgogne Franche-Comté

Réseau booléen (définition)

- Une fonction $f : \mathbb{B}^N \to \mathbb{B}^N$, $x = (x_1, \ldots, x_N) \mapsto (f_1(x), \ldots, f_N(x))$
- Un schéma de mise à jour de la suite $(x^t)^{t\in\mathbb{N}}$ des configurations :
  - *Parallèle synchrone :* $x^{t+1} = f(x^t)$.
  - *Unaire :* à partir de la *stratégie unaire* $\left(s^t\right)^{t\in\mathbb{N}} \in [N]^{\mathbb{N}}$, modification de l'élément s^t de x^t

$$x^{t+1} = (x_1^{t+1}, \ldots, x_n^{t+1}) \text{ où } x_i^{t+1} = \begin{cases} f_i(x^t) \text{ si } i = s^t \\ x_i^t \text{ sinon.} \end{cases}$$

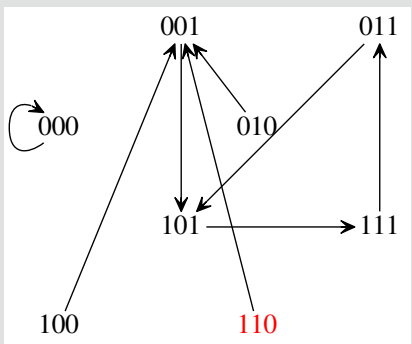
  - *Généralisé :* à partir de la *stratégie généralisée* $\left(s^t\right)^{t\in\mathbb{N}} \in \mathcal{P}([N])^{\mathbb{N}}$, modification des éléments de x^t dans $s^t \subset [N]$

$$x^{t+1} = (x_1^{t+1}, \ldots, x_n^{t+1}) \text{ où } x_i^{t+1} = \begin{cases} f_i(x^t) \text{ si } i \in s^t \\ x_i^t \text{ sinon} \end{cases}$$

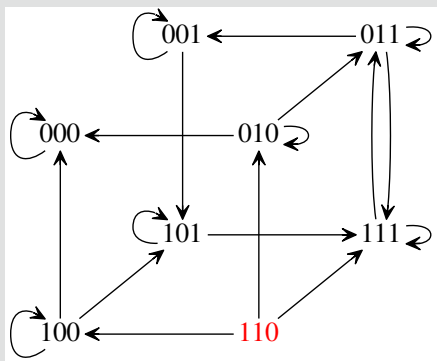
3 schémas $\rightsquigarrow$ 3 graphes d'itérations

Graphes des itérations de

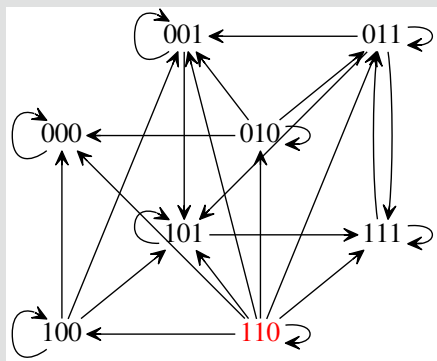
$(x_1, x_2, x_3) \mapsto ((\overline{x_1} + \overline{x_2}).x_3, x_1.x_3, x_1 + x_2 + x_3)$.



(a) GIS(f)



(b) GIU(f)

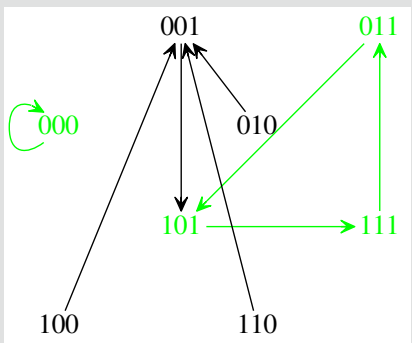


(c) GIG(f)

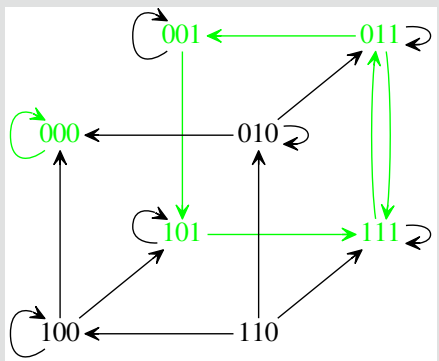
Attracteurs

- x *point fixe* de f si $x = f(x)$
- A *attracteurs* du graphe si
  - pour tout arc $x \to y$, si $x \in A$, alors $y \in A$ et
  - A : le plus petit au sens de l'inclusion

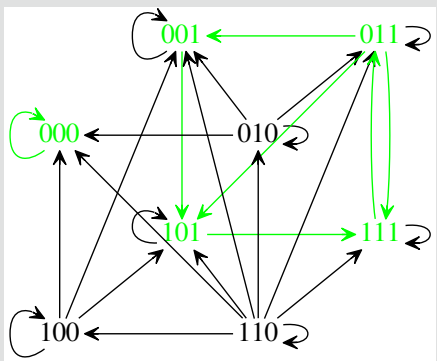
Attracteurs de $(x_1, x_2, x_3) \mapsto ((\overline{x_1} + \overline{x_2}).x_3, x_1.x_3, x_1 + x_2 + x_3)$.



(d) $A_1 = \{000\}$ et $A_2 = \{011, 101, 111\}$



(e) $A_1 = \{000\}$ et $A_2 = \{001, 101, 111, 011\}$



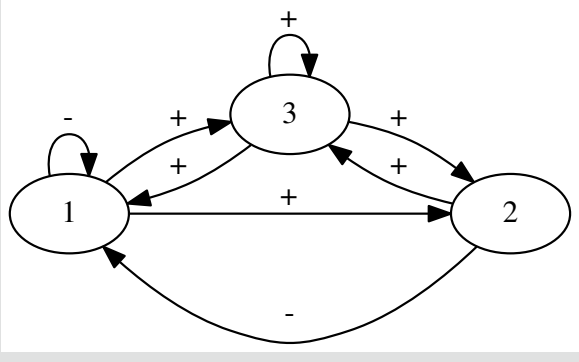
(f) $A_1 = \{000\}$ et $A_2 = \{001, 101, 111, 011\}$

Dépendance entre éléments

- Mat. de $\{-1,0,1\}^{N^2}$ des « dérivées partielles » $f'_{ij} = \frac{f_i(\overline{x}^j) - f_i(x)}{\overline{x_j} - x_j}$.
- Représentée par un *graphe des interactions* orienté :
  - Sommets : [N]
  - Arcs : $j \xrightarrow{s} i$ si $\exists x \in \mathbb{B}^N$ tq. $f'_{ij}(x) = s$, $s \in \{-1,1\}$

Graphes des interractions de $(x_1, x_2, x_3) \mapsto ((\overline{x_1} + \overline{x_2}).x_3, x_1.x_3, x_1 + x_2 + x_3)$.

$$f' = \begin{pmatrix} \frac{(x_1+\overline{x_2}).x_3-(\overline{x_1}+\overline{x_2}).x_3}{\overline{x_1}-x_1} & \frac{(\overline{x_1}+x_2).x_3-(\overline{x_1}+\overline{x_2}).x_3}{\overline{x_2}-x_2} & \dots \\ \frac{\overline{x_1}.x_3-x_1.x_3}{\overline{x_1}-x_1} & 0 & \dots \\ \frac{(\overline{x_1}+x_2+x_3)-(x_1+x_2+x_3)}{\overline{x_1}-x_1} & \dots & \dots \end{pmatrix}$$



Mode asynchrone

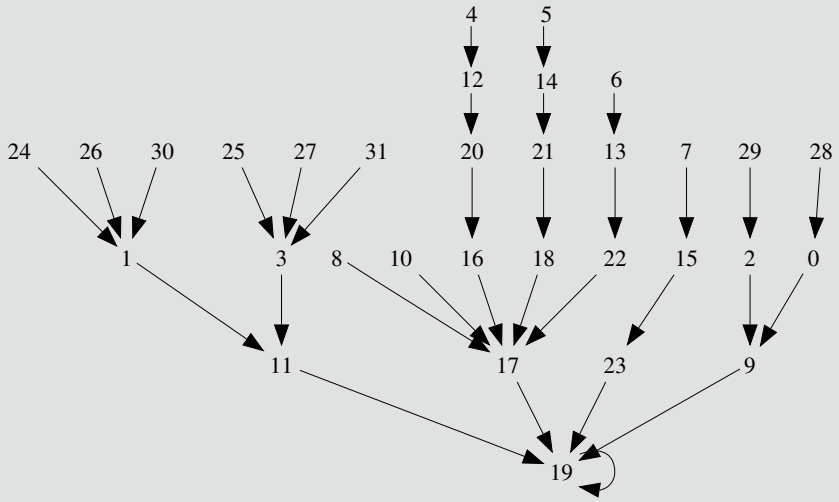
- Deux modes :
  - *Synchrone* : chaque élément attend la valeur des élements dont il dépend.
  - *Asynchrone* : chaque élément met à jour sa valeur sans attendre.
- $(D^t)^{t\in\mathbb{N}}$: suite de matrices de taille N $\times$ N t.q.

$$D_{ij}^t = \text{ date où } x_j \text{ est disponible au composant } i$$

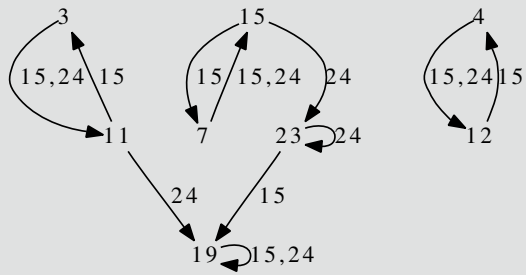
- $x_i^{t+1} = \begin{cases} f_i(x_1^{D_{i1}^t}, \ldots, x_N^{D_{iN}^t}) \text{ si } i \in s^t \\ x_i^t \text{ sinon} \end{cases}$

Un exemple motivant

$g(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = (x_1.\overline{x_2} + \overline{x_1}.x_2, \overline{x_1 + x_2}, x_3.\overline{x_1}, x_5, \overline{x_3} + x_4)$



(g) GIS(g)



(h) GIU(g) (extrait)

FIGURE – Graphes des itérations synchrones

- Avec $D^t = t$ sauf $D^t_{12} = t - 1$ pour t impair, g oscille entre 3 et 11.
- $\rightsquigarrow$ Schéma parallèle : converge en synchrone, diverge en asynchrone

Plan

1. Introduction : iterations de réseaux booléens
2. Réseaux booléens : des preuves de convergences
3. Des systèmes dynamiques discrets au chaos
4. Applications à la génération de nombres pseudo-aléatoires
5. Application au masquage d'information
6. Conclusion

Plan

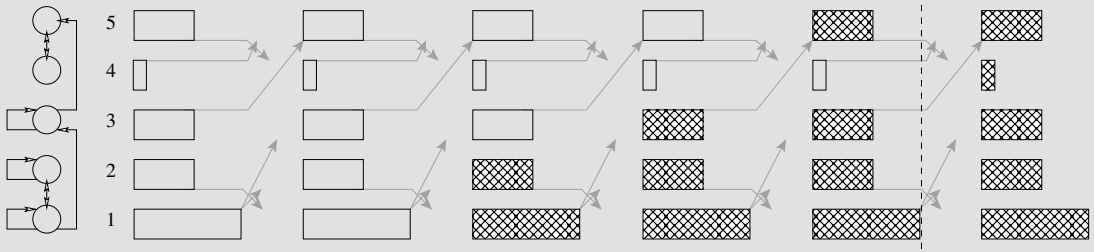
Suffisamment de synchronisme

- *Mode mixte* [ABCVS05] : regroupement des nœuds qui pourraient introduire des cycles.
  - A l'intérieur de chaque groupe : mode synchrone.
  - A l'extérieur de chaque groupe : mode asynchrone.
- Relation de synchronisation : $i \mathcal{R} j$ si i et j dans la même CFC du graphe des interactions.

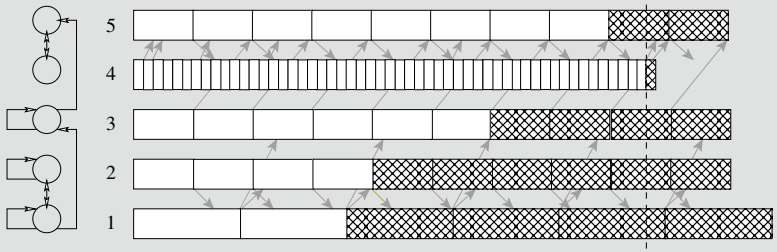
Théorème (Convergence des itérations mixtes [BCVC10])

Soit f possédant un unique point fixe x^* et une stratégie pseudo-périodique s. Si les itérations synchrones convergent vers x^* pour cette stratégie, alors les itérations mixtes à délai uniforme convergent aussi vers x^* pour cette stratégie.

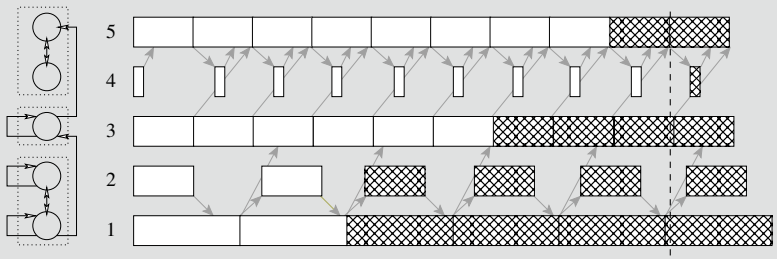
Mode mixte avec g



(a) Parallèle synchrone



(b) Asynchrone



(c) Mixte tq.$\langle 1\rangle = \{1,2\}$, $\langle 3\rangle = \{3\}$, $\langle 4\rangle = \{4,5\}$.

Convergence par la pratique

- Conditions suffisantes de convergence : facile à appliquer, domaine restreint.
- Recherche d'une métrique decroissante minorée : difficile.
- Simulations :
  - Non exhaustives pour les schémas généralisés et asynchrones.
  - Verdict $\leftrightarrow$ vérité ssi divergence (contre-exemple).
- Souhait : exploiter un outil qui traiterait toutes les transitions.
  - Explosion combinatoire : par abstraction, quotientage, ordre partiel...
  - Model checker : SPIN [Hol03].
  - Correction et complétude de la démarche.

Du système booléen au modèle PROMELA

- Points clefs de la traduction :
  - Stratégie : pseudo périodicité garantie par le choix indéterministe de SPIN.
  - Délais (bornés par construction) : oubli de certaines valeurs grâce à l'indéterminisme de SPIN.
- Convergence universelle : $\diamond(\square \mathtt{Xp} = \mathtt{X})$.

Théorème (Correction et complétude de la traduction vers Promela [Cou10])

Soit ϕ un modèle de système dynamique discret et ψ sa traduction PROMELA. Les itérations de ϕ sont universellement convergentes si et seulement si ψ vérifie la propriété LTL sous hypothèse d'équité faible.

- Bilan :
  - Preuve automatique de convergence de modèles indpt. schéma/mode.
  - A pu décider de la convergence d'exemples simples.
  - Ne passe pas à l'échelle.

Plan

Rappels sur les itérations chaotiques

Définition (Chaos selon Devaney)

k continue sur $(\mathcal{X}, d)$ est chaotique si elle est transitive, régulière et fortement sensible aux conditions initiales.

- *Transitivitivé* : pour chaque point, chacun de ses voisinages a un futur pouvant contenir tout point de l'espace.
- *Régularité* : l'ensemble de ses points périodiques est dense dans $\mathcal{X}$.
- *Forte sensibilité aux cond. initiales* : pour chaque point, chacun de ses voisinages a un point dont un futur est éloigné.

Espace pour itérations chaotiques (unaires)

- Vers une fonction de $\mathcal{X}_u = \mathbb{B}^N \times [N]^{\mathbb{N}}$ dans lui même [Guy10] :
  - $F_{f_u} : \mathbb{B}^N \times [N] \to \mathbb{B}^N, (x, i) \mapsto (x_1, \ldots, x_{i-1}, f_i(x), x_{i+1}, \ldots, x_N)$
  - $\sigma : [N]^{\mathbb{N}} \to [N]^{\mathbb{N}}$ t.q. $\forall t \in \mathbb{N}, \sigma(s)_t = s_{t+1}$
  - G_{f_u} définie par $G_{f_u}(x, s) = (F_{f_u}(x, s_0), \sigma(s))$
- Distance d : $d((x, s), (x', s')) = d_H(x, x') + d_S(s, s')$

Théorème (Fonctions t.q. G_{f_u} est chaotique [BCG12b])

Soit $f : \mathbb{B}^N \to \mathbb{B}^N$. Les itérations de la fonction G_{f_u} sont chaotiques si et seulement si GIU(f) *est fortement connexe.*

Espace pour itérations chaotiques (généralisées)

- Vers une fonction de $\mathcal{X}_g = \mathbb{B}^N \times (\mathcal{P}([N])^{\mathbb{N}}$ dans lui même :
  - $F_{f_g} : \mathbb{B}^N \times \mathcal{P}([N]) \to \mathbb{B}^N$ par $F_{f_g}(x,s)_i = \begin{cases} f_i(x) \text{ si } i \in s ; \\ x_i \text{ sinon.} \end{cases}$
  - $\sigma : \mathcal{P}([N])^{\mathbb{N}} \to \mathcal{P}([N])^{\mathbb{N}}$ t.q. $\forall t \in \mathbb{N}, \sigma(s)_t = s_{t+1}$
  - G_{f_g} définie par $G_{f_g}(x,S) = (F_{f_g}(x,s_0), \sigma(S))$,
- Distance d : $d((x,s),(x',s')) = d_H(x,x') + d'_S(s,s')$

Théorème (Fonctions t.q. G_{f_g} est chaotique)

Soit $f : \mathbb{B}^N \to \mathbb{B}^N$. Les itérations de la fonction G_{f_g} sont chaotiques si et seulement si GIG(f) *est fortement connexe.*

Générer un graphe GIU fortement connexe

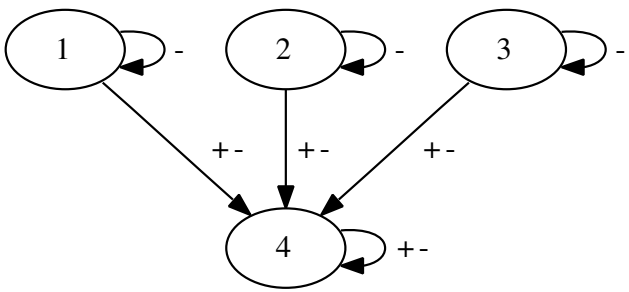
- Méthode naïve : suppressions successives aléatoires d'arcs de GIU($\neg$).

Théorème (Fonctions avec GIU fort. connexe [BCGR11])

Soit f une fonction de $\mathbb{B}^N$ vers lui-même telle que $\Gamma(f)$:

1. *N'a pas de cycle de longueur supérieure ou égale à deux.*
2. *Chacun des sommets avec une boucle + a aussi une boucle -.*
3. *Chacun des sommets est accessible depuis un sommet avec une boucle -.*

Alors, GIU(f) *est fortement connexe.*



$\rightsquigarrow \left\{ \begin{array}{l} 34226 \text{ fonctions} \\ 520 \text{ non isomorphes} \end{array} \right.$

Apprendre un comportement chaotique par MLP [BCGS12]

- Il est possible de construire un MLP ayant un comportement chaotique.
- Il est difficile pour un MLP d'apprendre des itérations chaotiques.

Plan

PRNG par itérations unaires

Algorithme [BCGW11]

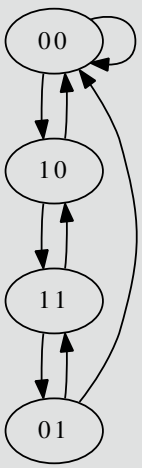
Input: une fonction f, un nombre d'itérations b, une configuration initiale x^0 (N bits)
Output: une configuration x (N bits)
$x \leftarrow x^0$;
for $i = 1, \ldots, b$ **do**
  $s \leftarrow \mathit{Random}(\mathrm{N})$;
  $x \leftarrow F_{f_u}(x, s)$;
end
return x;

- *Random* : un PRNG (N bits).
- Remarques :
  - $b = 1 \rightsquigarrow$ itérations (chaotiques) de F_{f_u}
  - Quid de l'uniformité de la sortie ?

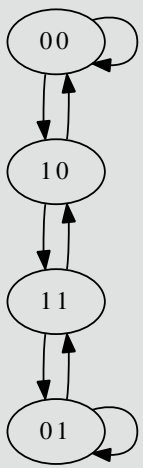
Condition néc. suff. pour l'uniformité

Théorème (Uniformité de la sortie [BCGR11])

Soit $f : \mathbb{B}^N \to \mathbb{B}^N$, GIU($f$) *son graphe d'itérations ,* $\check{M}$ *sa matrice d'adjacence. Si* GIU(f) *est fortement connexe, alors la sortie du générateur de nombres pseudo-aléatoires suit une loi qui tend vers la distribution uniforme ssi* $\frac{1}{N}\check{M}$ *est doublement stochastique.*



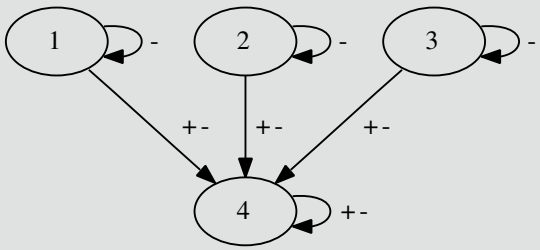
- $g(x_1, x_2) = (\overline{x_1}, x_1\overline{x_2})$
- $M_g = \frac{1}{2}\begin{pmatrix} 1010 \\ 1001 \\ 1001 \\ 0110 \end{pmatrix}$
- $\pi_g = (\frac{4}{10}, \frac{1}{10}, \frac{3}{10}, \frac{2}{10})$



- $h(x_1, x_2) = (\overline{x_1}, x_1\overline{x_2} + \overline{x_1}x_2)$
- $M_h = \frac{1}{2}\begin{pmatrix} 1010 \\ 0101 \\ 1001 \\ 0110 \end{pmatrix}$
- $\pi_h = (\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2})$

Succès pratiques et limites théoriques

- Seules 16 vérifient les hypothèses du théorème précédent.
- b : nombre d'itérations suffisant pour une déviation p.r. la distribution uniforme inf. à 10^{-4}.



Nom	Définition	b
$\mathcal{F}_1$	14, 15, 12, 13, 10, 11, 8, 9, 6, 7, 4, 5, 2, 3, 1, 0	206
⋮	⋮	⋮
$\mathcal{F}_9$	14, 15, 12, 13, 10, 11, 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 0, 1	42
⋮	⋮	⋮
$\mathcal{F}_{16}$	14, 15, 13, 12, 11, 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1, 0	206

- Succès de tous les PRNGs issus de ces fonctions aux tests du *National Institute of Standards and Technology* (NIST).

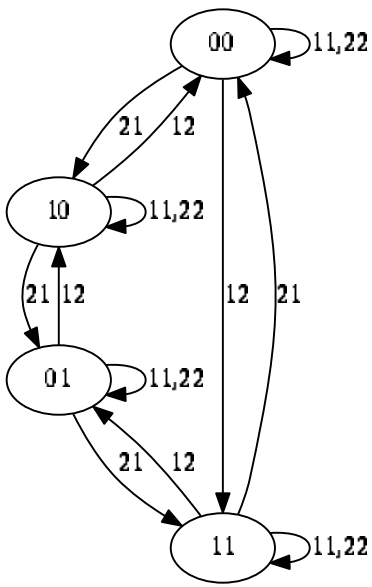
- Erreur de raisonnement :
  - Générateur prouvé chaotique seulement pour $b = 1$.
  - Pas compatible avec la pratique : $b \geq 42$ nécessaire pour suivre une loi uniforme (à 10^{-4} près).
  - $\rightsquigarrow$ Etendre la théorie.

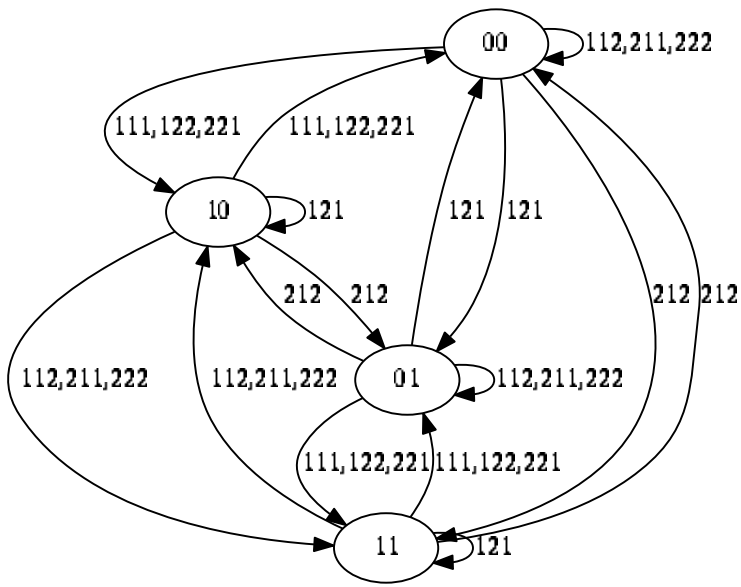
Espace pour itérations chaotiques (b)

- Vers une fonction de $\mathcal{X}_u = \mathbb{B}^N \times [\![1;N]\!]^{\mathbb{N}}$ dans lui même [CCVHG16] :
  - $F_{f_u} : \mathbb{B}^N \times [\![1;N]\!] \to \mathbb{B}^N$, $(x,i) \mapsto (x_1, \ldots, x_{i-1}, f_i(x), x_{i+1}, \ldots, x_N)$
  - $\sigma : [\![1;N]\!]^{\mathbb{N}} \to [\![1;N]\!]^{\mathbb{N}}$ t.q. $\forall t \in \mathbb{N}, \sigma(s)_t = s_{t+1}$
  - $G_{f_u,b}$ définie par $G_{f_u,b}(x,s) = (F_{f_u}(\ldots(F_{f_u}(x,s_0),\ldots),s_{b-1}), \sigma^b(s))$
- Distance $d((x,s),(x',s')) = d_H(x,x') + d''_S(s,s')$

Théorème (Fonctions t.q. $G_{f_u,b}$ est chaotique [CCVHG16])

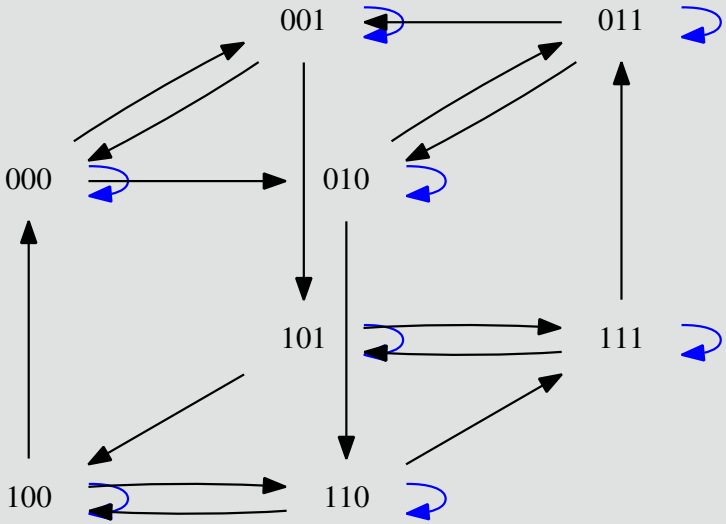
La fonction $G_{f_u,b}$ est chaotique sur $(\mathcal{X}_u, d)$ si et seulement si le graphe d'itérations $\mathrm{GIU}_b(f)$ est fortement connexe.





GIU fortement connexe par construction

- CLPFD : approche de type « générer, tester ».
- $f^*(x_1, x_2, x_3) = (x_2 \oplus x_3, \overline{x_1 x_3} + x_1 \overline{x_2}, \overline{x_1 x_3} + x_1 x_2)$: très faible b.
- f^* : 3-cube ss le *cycle hamiltonien* 000, 100, 101, 001, 011, 111, 110, 010, 000.



$$M = \frac{1}{3}\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

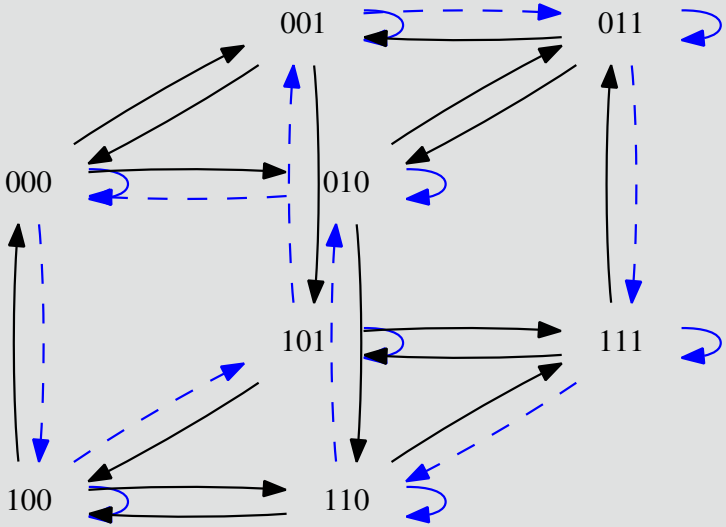
Théorème (N-cube privé d'un cycle hamiltonien [CHG+14a])

Dans un N*-cube, dans lequel un cycle hamiltonien a été enelvé :*

- *La matrice de Markov engendrée est doublement stochastique.*
- *Le graphe* GIU *correspondant est fortement connexe.*

GIU fortement connexe par construction

- CLPFD : approche de type « générer, tester ».
- $f^*(x_1, x_2, x_3) = (x_2 \oplus x_3, \overline{x_1 x_3} + x_1 \overline{x_2}, \overline{x_1 x_3} + x_1 x_2)$: très faible b.
- f^* : 3-cube ss le *cycle hamiltonien* 000, 100, 101, 001, 011, 111, 110, 010, 000.



$$M = \frac{1}{3}\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Théorème (N-cube privé d'un cycle hamiltonien [CHG+14a])

Dans un N*-cube, dans lequel un cycle hamiltonien a été enelvé :*

- *La matrice de Markov engendrée est doublement stochastique.*
- *Le graphe* GIU *correspondant est fortement connexe.*

Cycle hamiltonien équilibré

- Intuition de convergence rapide vers la distribution uniforme : supprimer un cycle hamiltonien équilibré (chaque bit nié autant de fois).
- Extension de *Robinson-Cohn* [ZS04] : preuve de l'existence (sans construction) de cycle hamiltonien équilibré.

Théorème (Constr. de cycle hamiltonien équilibré [CCVHG16])

Il existe une séquence (et construction de celle-ci) dans de l'extension de l'algorithme de Robinson-Cohn telle que le cycle est équilibré.

- Pratique : grande famille de cycles hamiltonien équilibrés ($N \leq 16$).

Evaluation de l'écart / ditribution uniforme

Théorème (Temps de mixage sans chemin hamiltonien [CCVHG16])

On considère un N*-cube dans lequel un chemin hamiltonien a été supprimé et la fonction de probabilités p définie sur l'ensemble des arcs comme suit :*

$$p(e) \begin{cases} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2N} \; si \; e = (v, v) \; avec \; v \in \mathbb{B}^N, \\ = \frac{1}{2N} \; sinon. \end{cases}$$

La chaîne de Markov associée converge vers la distribution uniforme et

$$t_{\text{mix}}(\varepsilon) \leq \lceil \log_2(\varepsilon^{-1}) \rceil 4(8N^2 + 4N \ln(N+1))$$

- Remarques sur la preuve :
  - Itérations paresseuses $\not\equiv$ algorithme.
  - Hypothèse très faible : suppressions d'un arc entrant et d'un arc sortant par nœud.
  - Pratiquement : $4(8N^2 + 4N \ln(N+1)) \rightsquigarrow 4(2N \ln(2N+8))$.

Et les itérations généralisées ?

Input: une fonction f, un nombre d'itérations b, une configuration initiale x^0 (N bits)
Output: une configuration x (N bits)
$x \leftarrow x^0$;
$k \leftarrow b$;
for $i = 1, \ldots, k$ **do**
  $s \leftarrow Set(Random(2^N))$;
  $x \leftarrow F_{f_g}(x, s)$;
end
return x;

Théorème (Uniformité de la sortie ds le cas généralisé)

Soit $f : \mathbb{B}^N \to \mathbb{B}^N$ et $\check{M}$ sa matrice d'adjacence. Si $\mathrm{GIG}(f)$ est fortement connexe, alors la sortie du PRNG suit une loi qui tend vers la distribution uniforme si et ssi $\frac{1}{2^N}\check{M}$ est une matrice doublement stochastique.

Analyse pratique des deux classes de PRNGS

Nombre moyen d'appels à un générateur binaire par bit généré

Itérations	4	5	6	7	8
Unaires	19.0	22.3	23.7	25.3	27.0
Généralisées	17	13	11	10	9

- Fréqence des configurations non accessibles en 1 itération :
  - Unaire : $1 - \frac{n-1}{2^n}$ (croissant).
  - généralisée : $1/2$ (constant), mais décroissance de la fréquence des bits constants.
- Test de NIST : succès dans tous les cas.

Plan

Marquage de média : un processsus iteratif

Définition (Embarquement dhCI étendu [BCG11b])

Soit un hôte x, u_m les indices de ses bits modifiables, ϕ_m leur valeur, y un message, q un nombre d'itération. L'algorithme d'embarquement retourne le résultat de l'embarquement de $\hat{y}$ dans x, t. q. :

- La fonction $f_l : \mathbb{B}^l \to \mathbb{B}^l$, $l = |u_m|$.
- Une stratégie $(s_y)^{t \in \mathbb{N}} \in [l]^{\mathbb{N}}$ est instanciée en fonction de y.
- $\hat{y}$ est définie par $(\hat{y}, \_) = G^q_{f_l}(\phi_m, s_y)$.

Théorème (Stego-sécurité et chaos-sécurité [BCG12b])

Si (s_y) est indépendante de x, si f_l est tq. $\mathrm{GIU}(f_l)$ fortement connexe et a une matrice de Markov doublement stochastique.

- *Le marquage est ϵ-stégo sécure.*
- *Le marquage est chaos sécure.*

- Particularisation dans différents domaines (spatial, fréquentiel).
- Robustesse evaluée.

Embarquons plus qu'un bit

Définition (Marquage non binaire chaotique [FGB11])

- Marque $m \in \mathbb{B}^{\mathrm{P}}$.
- Support modifiable pour la marque : $x^0 \in \mathbb{B}^{\mathrm{N}}$.
- Stratégie de place $s_p \in [\mathrm{N}]^{\mathbb{N}}$: élément de x modifié à l'itération t.
- Stratégie de choix $s_c \in [\mathrm{P}]^{\mathbb{N}}$: indice de l'élément de m embarqué à l'itération t.
- Stratégie de mélange $s_m \in [\mathrm{P}]^{\mathbb{N}}$: élément de m inversé à l'titération t.

On remplace x par $x^l \in \mathbb{B}^{\mathrm{N}}$ avec $x_i^t = \begin{cases} m_{s_c^t}^{t-1} \text{ si } s_p^t = i \\ x_i^{t-1} \text{ sinon} \end{cases}$ et $m_i^t = \begin{cases} \overline{m_i^{t-1}} \text{ si } s_m^t = i \\ m_i^{t-1} \text{ sinon} \end{cases}$

Théorème (Correction et complétude du marquage [BCF+13])

Soit $\Im(s_p) = \{S_p^1, S_p^2, \ldots, S_p^l\}$, $k = |\Im(s_p)|$ et $\Im(s_c)_{|D} = \{S_c^{d_1}, S_c^{d_2}, \ldots, S_c^{d_k}\}$ où d_i est la dernière date où l'élément $i \in \Im(s_p)$ a été modifié. « $\Im(s_c)_{|D} = [\![0; \mathrm{P}-1]\!]$ » est une condition nécessaire et suffisante pour l'extraction du message du média marqué.

- Pratique : mesure de Fermi-Dirac utilisée pour la classification.

Tatouage (flottant) de PDF

- Tatouage de documents PDF : très peu étudié.
- STDM : un (des) schémas les plus robustes et les plus sécurisés de tatouage.

STDM dans les PDF textuels [BDCC15]

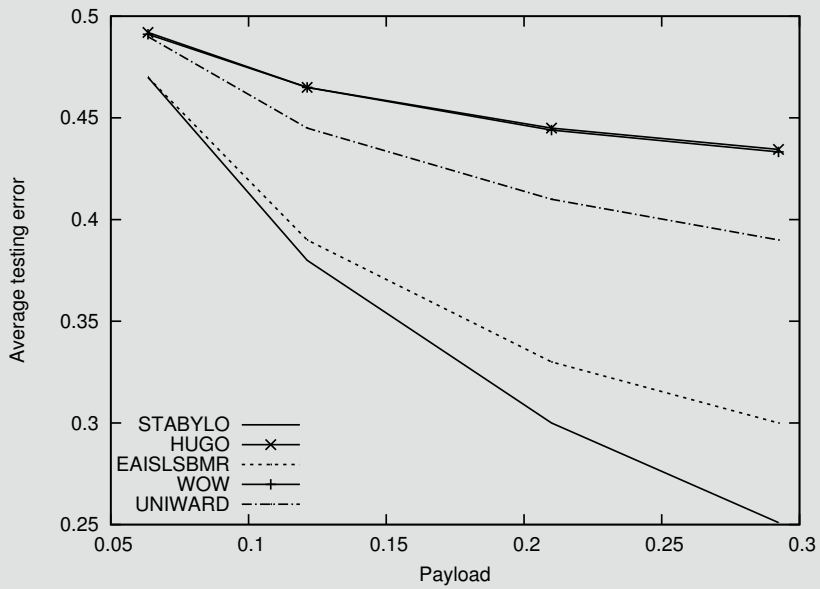
- Hôte : l'ensemble des abscisses des caractères du document.
- Application directe de STDM, de quantification Δ.
- Compromis :
  - Robustesse : possibilité de retrouver la marque face à chaque attaque qui laissant le document lisible.
  - Imperceptibilité : le document initialement lisible.

Stéganographie : introduction avec STABYLO

- Stéganographie :
  - Objectif : embarquer un message de manière imperceptible.
  - Méthode : construction d'une carte de distorsion des éléments modifiables.
  - Evaluation de la sécurité : étude de la détectabilité par steganalyse.

STeg. with Adaptive, Bbs, binarY emb. at LOw cost [CCG15]

- Carte de distorsion : les pixels de bord peuvent être modifiés.
- Faible complexité : produit de convolution de Canny sur des petites fenêtres.

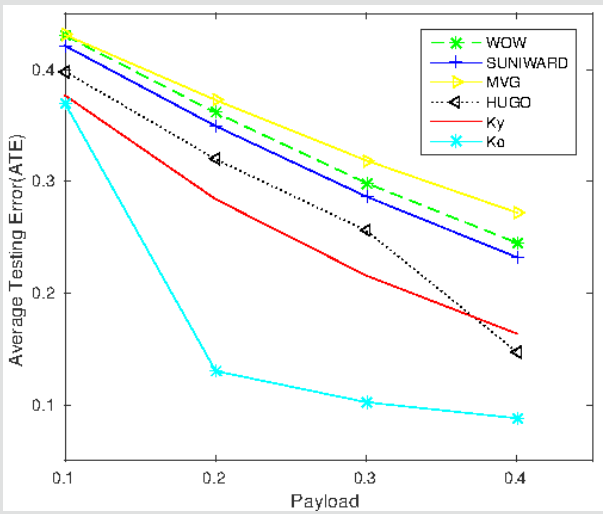


Stéganographie : analyse vectorielle discrète

- Détectabilité de modification :
  - Facile : les régions uniformes, les bords clairement définis...
  - Difficile : les textures, le bruit, les régions “chaotiques”... $\leftrightarrows$ courbes de niveau très perturbées.
- Mathématiques des courbes de niveau : gradient, matrice hessienne.
- Signature d'une image : $P : [I] \times [L] \to \mathbb{R}$ et pas $\mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$.

Gradient dans des image [CCFG16]

- Approches usuelles : convolutions avec des noyaux de type ‘Sobel”, “Prewitt”,...
- Proposition : noyaux de taille variable (entre 3 et 13)
  1. *Ky* : symétrique, centré, approximation discrète de dérivée seconde.
  2. *Ko* : à base de polynômes d'interpolation.



Plan

Synthèse scientifique

- Etude de convergence des SDDs : un nouveau mode, des preuves écrites, des preuves obtenues gratuitement (SPIN).
- Fonctions engendrant des itérations chaotiques : CS sur le graphe d'interaction, par suppression d'1 cycle hamiltonien équilibré.
- Application aux PRNG : étude théorique et pratique de la sortie en fonction du nombre d'itérations.
- Masquage d'information : de la propriété de transitivité du chaos à l'analyse vectorielle discrète.

Perspectives

- Cycles hamiltoniens équilibrés :
  - S'affranchir de l'algorithme *Robinson-Cohn* : trop restrictif.
  - Génération exhaustive de cycles non isomorphes : une forme canonique.
  - Equilibre local, global : conséquences dans un PRNG.
- Générateurs de nombres pseudo-aléatoires :
  - Implantation sur FPGA ou ASIC : comparaison pratique avec l'état de l'art.
  - S'affranchir du générateur interne.
  - Majorer finement le délai d'obtention de la distribution uniforme.
  - Exploiter le GIG à la place du GIU.
- Masquage d'information :
  - Creuser la piste « Analyse vectorielle ».
  - Steganalyse par Deep Learning : comprendre pourquoi cela marche.
  - Tatouage STDM dans un PDF : comment contrer les attaques ?

Bilan académique

- Encadrement doctoral :
  - Soutenue : dec. 16, Bassam Alkindy (40%).
  - En cours : Youssra Fadil (50%), Mohamed Bakiri (50%), Nesrine Khernane (50%).
- 10 Reviews de journaux internationaux référencés.
- 2$\times$ sessionchair, 1$\times$ chairman en conférence internationale.
- 1 projet région (15–18) “capteurs multimédias collaboratifs : une approche intégrée de la sécurité et de la robustesse”.
- Publications depuis l’intégration dans DISC-AND :

Journaux internationaux	Conférences internationales
[BCG12a, BCG12b, BCGS12] [CDS13, CCG15, BDCC15] [CCVHG16]	[AAG$^+$15, BCFG12a, BCFG12b, BCF$^+$13] [BCG11a, BCG11b, ACGS13, CHG$^+$14b] [BCGR11, BCGW11, CDS12, CHG$^+$14a] [FCCG15, BCC$^+$15, BCG16, CCFG16, KCM16]

- Mandat d’élu : conseil d’institut de l’IUT BM (10–14).
- Réponsabilité pédagogique : responsable de la LP SIL CAM, TeProw (14–. . .).

Bassam AlKindy, Bashar Al-Nuaimi, Christophe Guyeux, Jean-François Couchot, Michel Salomon, Reem Alsrraj, and Laurent Philippe.
Binary particle swarm optimization versus hybrid genetic algorithm for inferring well supported phylogenetic trees.
In Claudia Angelini, Paola M. V. Rancoita, and Stefano Rovetta, editors, *Computational Intelligence Methods for Bioinformatics and Biostatistics - 12th International Meeting, CIBB 2015, Naples, Italy, September 10-12, 2015, Revised Selected Papers*, volume 9874 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 165–179. Springer, 2015.

A. Abbas, J. M. Bahi, S. Contassot-Vivier, and M. Salomon.
Mixing synchronism / asynchronism in discrete-state discrete-time dynamic networks.
In *4th Int. Conf. on Engineering Applications and Computational Algorithms, DCDIS'2005*, pages 524–529, Guelph, Canada, July 2005.

ISSN 1492-8760.


Bassam Alkindy, Jean-François Couchot, Christophe Guyeux, and Michel Salomon.
Finding the core-genes of chloroplast species.
Journées SeqBio 2013, Montpellier, November 2013.


B. Al Bouna, J. F. Couchot, R. Couturier, Y. A. Fadil, and C. Guyeux.
Performance study of steganalysis techniques.
In *Applied Research in Computer Science and Engineering (ICAR), 2015 International Conference on*, pages 1–7, Lebanon, October 2015.


Jacques Bahi, Jean-François Couchot, Nicolas Friot, Christophe Guyeux, and Kamel Mazouzi.
Quality studies of an invisible chaos-based watermarking scheme with message extraction.

In *IIHMSP'13, 9th Int. Conf. on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing*, pages 547–550, Beijing, China, October 2013.

Jacques Bahi, Jean-François Couchot, Nicolas Friot, and Christophe Guyeux.
Application of steganography for anonymity through the internet.
In *IHTIAP'2012, 1-st Workshop on Information Hiding Techniques for Internet Anonymity and Privacy*, pages 96–101, Venice, Italy, June 2012.

Jacques Bahi, Jean-François Couchot, Nicolas Friot, and Christophe Guyeux.
A robust data hiding process contributing to the development of a semantic web.
In *INTERNET'2012, 4-th Int. Conf. on Evolving Internet*, pages 71–76, Venice, Italy, June 2012.

Jacques Bahi, Jean-François Couchot, and Christophe Guyeux.
Performance analysis of a keyed hash function based on discrete and chaotic proven iterations.
In *INTERNET 2011, the 3-rd Int. Conf. on Evolving Internet*, pages 52–57, Luxembourg, Luxembourg, June 2011.
Best paper award.

Jacques Bahi, Jean-François Couchot, and Christophe Guyeux.
Steganography : a class of algorithms having secure properties.
In *IIH-MSP-2011, 7-th Int. Conf. on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing*, pages 109–112, Dalian, China, October 2011.

Jacques Bahi, Jean-François Couchot, and Christophe Guyeux.
Quality analysis of a chaotic proven keyed hash function.

International Journal On Advances in Internet Technology, 5(1) :26–33, 2012.

Jacques Bahi, Jean-François Couchot, and Christophe Guyeux.
Steganography : a class of secure and robust algorithms.
The Computer Journal, 55(6) :653–666, 2012.

Mohammed Bakiri, Jean-François Couchot, and Christophe Guyeux.
FPGA implementation of f2-linear pseudorandom number generators based on zynq mpsoc : A chaotic iterations post processing case study.
In Christian Callegari, Marten van Sinderen, Panagiotis G. Sarigiannidis, Pierangela Samarati, Enrique Cabello, Pascal Lorenz, and Mohammad S. Obaidat, editors, *Proceedings of the 13th International Joint Conference on e-Business and Telecommunications (ICETE 2016) -*

Volume 4 : SECRYPT, Lisbon, Portugal, July 26-28, 2016., pages 302–309. SciTePress, 2016.

Jacques Bahi, Jean-François Couchot, Christophe Guyeux, and Adrien Richard.
On the link between strongly connected iteration graphs and chaotic boolean discrete-time dynamical systems.
In *FCT'11, 18th Int. Symp. on Fundamentals of Computation Theory*, volume 6914 of *LNCS*, pages 126–137, Oslo, Norway, August 2011.

Jacques Bahi, Jean-François Couchot, Christophe Guyeux, and Michel Salomon.
Neural networks and chaos : Construction, evaluation of chaotic networks, and prediction of chaos with multilayer feedforward network.
Chaos, An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, 22(1) :013122–1 – 013122–9, March 2012.
9 pages.

Jacques Bahi, Jean-François Couchot, Christophe Guyeux, and Qianxue Wang.
Class of trustworthy pseudo random number generators.
In *INTERNET 2011, the 3-rd Int. Conf. on Evolving Internet*, pages 72–77, Luxembourg, Luxembourg, June 2011.

J. M. Bahi, S. Contassot-Vivier, and J.-F. Couchot.
Convergence results of combining synchronism and asynchronism for discrete-state discrete-time dynamic network.
Research Report RR2010-02, LIFC - Laboratoire d'Informatique de l'Université de Franche Comté, May 2010.

Ahmad W. Bitar, Rony Darazi, Jean-François Couchot, and Raphaël Couturier.
Blind digital watermarking in pdf documents using spread transform dither modulation.
Multimedia Tools and Applications, pages 1–19, 2015.

Jean-François Couchot, Raphaël Couturier, Yousra Ahmed Fadil, and Christophe Guyeux.
A second order derivatives based approach for steganography.
In *Secrypt 2016, 13th Int. Conf. on Security and Cryptography*, pages 424–431, Lisbon, July 2016.

Jean-François Couchot, Raphaël Couturier, and Christophe Guyeux.
STABYLO : steganography with adaptive, bbs, and binary embedding at low cost.
Annales des Télécommunications, 70(9-10) :441–449, 2015.

Jean-François Couchot, Sylvain Contassot-Vivier, Pierre-Cyrille Héam, and Christophe Guyeux.
Random walk in a n-cube without hamiltonian cycle to chaotic pseudorandom number generation : Theoretical and practical considerations.

International Journal of Bifurcation and Chaos, 2016. Accepted on Oct 2016.

Jean-François Couchot, Karine Deschinkel, and Michel Salomon.
Suitability of artificial neural network for MEMS-based flow control.
In Julien Bourgeois and Michel de Labachelerie, editors, *dMEMS 2012, Workshop on design, control and software implementation for distributed MEMS*, pages 1–6, Besançon, France, April 2012. IEEE CPS.

Jean-François Couchot, Karine Deschinkel, and Michel Salomon.
Active MEMS-based flow control using artificial neural network.
Mechatronics, 23(7) :898–905, October 2013. Available online.

Jean-François Couchot, Pierre-Cyrille Héam, Christophe Guyeux, Qianxue Wang, and Jacques Bahi.
Pseudorandom number generators with balanced gray codes.
In *Secrypt 2014, 11th Int. Conf. on Security and Cryptography*, pages 469–475, Vienna, Austria, August 2014.

Jean-François Couchot, Pierre-Cyrille Héam, Christophe Guyeux, Qianxue Wang, and Jacques Bahi.
Traversing a n-cube without balanced hamiltonian cycle to generate pseudorandom numbers.
15-th Mons Theoretical Computer Science Days (15e Journées Montoises d'Informatique Théorique), Nancy, France, September 2014.

J.-F. Couchot.
Formal Convergence Proof for Discrete Dynamical Systems.

Research Report RR2010-03, LIFC - Laboratoire d'Informatique de l'Université de Franche Comté, May 2010.


Yousra Ahmed Fadil, Jean-François Couchot, Raphaël Couturier, and Christophe Guyeux.
Steganalyzer performances in operational contexts.
In *IIH-MSP 2015, 11th Int. Conf. on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing*, pages 429–432, Adelaide, Australia, September 2015.


Nicolas Friot, Christophe Guyeux, and Jacques Bahi.
Chaotic iterations for steganography - stego-security and chaos-security.
In Javier Lopez and Pierangela Samarati, editors, *SECRYPT'2011, Int. Conf. on Security and Cryptography. SECRYPT is part of ICETE - The International Joint Conference on e-Business and Telecommunications*, pages 218–227, Sevilla, Spain, July 2011. SciTePress.

Christophe Guyeux.
Le désordre des itérations chaotiques et leur utilité en sécurité informatique.
Thèse de Doctorat, LIFC, Université de Franche-Comté, 13 décembre 2010.
Rapporteurs : Pascale Charpin, Directrice de Recherche, INRIA-Rocquencourt ; Eric Filiol, Professeur, ESIEA-Laval ; Pierre Spitéri, Professeur Emérite, IRIT-ENSEEIHT.
Examinateurs : Michel de Labachelerie, Directeur de recherche CNRS, Université de Franche-Comté ; Laurent Larger, Professeur, Université de Franche-Comté ; Jean-Claude Miellou, Professeur, Université de Franche-Comté ; Congduc Pham, Professeur, Université de Pau. Directeur : Jacques M. Bahi, Professeur, Université de Franche-Comté.

Gerard J. Holzmann.
The SPIN Model Checker : Primer and Reference Manual.

Addison-Wesley, Pearson Education, 2003.

N. Khernane, J.-F. Couchot, and A. Mostefaoui.
Maximizing network lifetime in wireless video sensor networks under quality constraints.
In *MOBIWAC 2016 : The 14th ACM* International Symposium on Mobility Management and Wireless Access*, November 2016.

A. J. van Zanten and I. N. Suparta.
Totally balanced and exponentially balanced gray codes.
Discrete Analysis and Operational Research, 11 :81–98, 2004.