Operation Rubicon

Analyse Cryptographique des Machines Crypto AG

Arnaud Gomes

Université de Bordeaux

26 février 2026

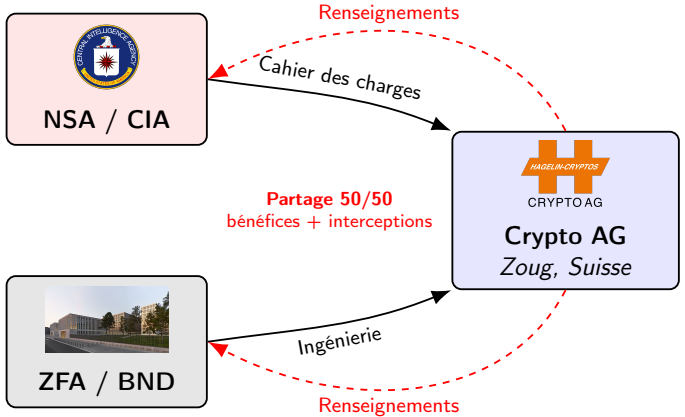
- **Sujet :** Plus grande opération d'espionnage crypto du XXe siècle.
- **Acteurs :** CIA + BND possèdent secrètement Crypto AG (leader mondial chiffrement) pendant 50 ans.
- **Cible :** Équipements vendus à diplomates et gouvernements du monde entier.
- **Nature de la faille :** Pas une erreur de code ; backdoor mathématique implantée au niveau matériel.
- **Objectif :** Affaiblir l'espace des clés de multiples gouvernements.

Le Contexte : Le Partenariat CIA / BND

université de BORDEAUX

L'Opération Rubicon (Thesaurus)

- Accord secret signé en 1970.
- Achat de Crypto AG via des sociétés écrans au Liechtenstein.
- Partage à 50/50 des bénéfices... et des interceptions diplomatiques.



[Vidéo : Sylvqin, L'Affaire Crypto AG, 2021]

- **Date clé :** 1970, Guerre Froide ; accord secret "Thesaurus" (rebaptisé Rubicon).
- **Montage :** Rachat de Crypto AG (Zoug, Suisse) via sociétés écrans au Liechtenstein.
- **Partage :** Bénéfices commerciaux 50/50 entre CIA et BND.
- **Point crucial :** NSA et ZFA imposent les algorithmes de chiffrement ; contrôle total de la chaîne de production.

Le Couvert de la Neutralité Suisse

Leader mondial du chiffrement matériel (ex : HC-520, HC-570). Vendu à +120 pays sous couvert de stricte neutralité.

Le Mécanisme Commercial :

- **Machines Dédiées :** Boîtiers électromécaniques lourds.
- **Boîte Noire :** Algorithmes propriétaires hardware non-documentés ("Security by Obscurity").
- **Légitimité :** Promesse de sécurité mathématique par Boris Hagelin.

Une machine de type Hagelin CX-52.

- **Neutralité suisse :** Aura politique ⇒ fournisseur idéal pour tous les gouvernements.
- **Hardware lourd :** Blocs physiques (Hagelin) considérés inviolables.
- **Boîte noire :** Algorithmes HC-500 gravés dans le silicium, aucune doc mathématique fournie.
- **Danger :** "Security by Obscurity" = concept fondamentalement vicié en cryptographie.

Le Contexte : Les Deux Versions (A et B)

université de BORDEAUX

Version A : "Alliés"

- États-Unis, Royaume-Uni, OTAN.
- Machines totalement sécurisées.
- Algorithme robuste non-compromis.

Version B : "Le Reste du Monde"

- Iran, Libye, Argentine, Inde, Vatican...
- Machines comportant la backdoor implantée par la NSA.
- Messages lisibles en temps réel par NSA/BND.

Même les ingénieurs et commerciaux de Crypto AG (ex : Hans Bühler en Iran) ignoraient manipuler des versions truquées.

- **Double production :** Même machine, algorithme interne différent.
- **Version A :** OTAN / alliés ; chiffrement robuste non-compromis.
- **Version B :** Reste du monde (Iran, Libye, Argentine, Inde...) ; backdoor NSA implantée.
- **Résultat :** Câbles diplomatiques lisibles en clair par NSA/BND.
- **Cloisonnement :** Même les ingénieurs Crypto AG ignoraient la fraude ; seule une micro-cellule concevait la faille.

Cas n°1 : La Guerre des Malouines (1982)

- **Le Contexte :** Conflit armé entre le Royaume-Uni et l'Argentine (cliente de Crypto AG, "Version B").
- **L'Exploitation :** La junte militaire argentine chiffrait l'intégralité de ses communications navales tactiques avec des machines de la série Hagelin CX-52 / HC-500.
- **Résultat Opérationnel :** La NSA déchiffre les positions navales argentines en temps réel et transmet les renseignements à Londres via les accords Five Eyes.

Asymétrie du Renseignement

L'Argentine, pensant son canal diplomatique sécurisé, négociait publiquement aux Nations-Unies tout en planifiant des frappes. Le Royaume-Uni, bénéficiaire des interceptions NSA/BND, disposait d'un avantage informationnel décisif.

- **Cas concret :** Guerre des Malouines, 1982.
- **Confiance aveugle :** Argentine chiffrait tout via Hagelin CX-52/HC-500 (Version B).
- **Compromission totale :** Canaux tactiques et stratégiques lisibles par la NSA.
- **Relais Five Eyes :** NSA déchiffre en temps réel $\Rightarrow$ renseignements transmis à Londres.
- **Avantage décisif :** UK connaissait positions navales argentines avant les frappes.

L'Impact Historique : L'Iran et la Libye

université de BORDEAUX

Cas n°2 : Espionnage étatique et Anti-terrorisme (Années 70-80)

Crise des otages en Iran (1979)

- Crise diplomatique : 52 américains retenus à Téhéran.
- Jimmy Carter (USA) observe la diplomatie ennemie en temps réel via l'interception des HC-500 iraniennes.

Attentat "La Belle" Berlin (1986)

- Ronald Reagan accuse Mouammar Kadhafi de l'attentat de Berlin-Ouest.
- Preuve formelle : les télégrammes de "félicitations" libyens chiffrés par Crypto AG ont été déchiffrés quasi-instantanément par l'infrastructure de la NSA, fournissant un accès direct au texte clair.

Conséquence globale : durant toute la Guerre Froide, la CIA a intercepté les communications de plus de 120 pays de manière systématique.

[Vidéo : Sylvqin, L'Affaire Crypto AG, 2021]

- **Iran 1979 :** HC-500 Version B léguées par le Shah ; Carter lit les discussions internes de Khomeini en temps réel.
- **Berlin 1986 :** Attentat "La Belle" ; Reagan invoque des "preuves absolues".
- **Source secrète :** Câbles libyens ("Félicitations pour Berlin") déchiffrés quasi-instantanément via backdoor Crypto AG.
- **Bilan global :** Trafic diplomatique du bloc non-aligné systématiquement intercepté ; +120 pays compromis.

Modèle (Cours Chap. II, Sect. 3)

Les machines Crypto AG utilisent un **chiffrement par flot synchrone**. Le message clair m_t est chiffré bit à bit avec la suite chiffrante z_t :

Équation Fondamentale

$$c_t = m_t \oplus z_t$$

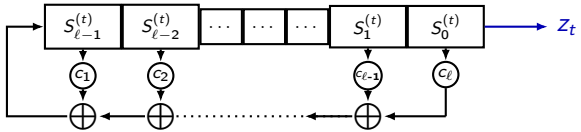
Pourquoi en hardware (1970–1990) ?

- Implémentation en portes logiques extrêmement compacte.
- Symétrie : déchiffrement identique ($m_t = c_t \oplus z_t$).
- Pas de propagation d'erreur sur ligne radio/télex.

- **Réf. cours :** Chap. II, Sect. 3 : chiffrement par flot synchrone.
- **XOR :** Bit à bit $\Rightarrow$ trivial en silicium.
- **Tolérance erreur :** 1 bit corrompu = 1 bit perdu (pas de propagation télex).
- **Clé de voûte :** Sécurité $\equiv$ qualité de la suite chiffrante z_t.

Le Générateur : LFSR

La suite chiffrante est produite par un **LFSR** (Linear Feedback Shift Register) : un automate linéaire sur $\mathbb{F}_2$.



- **État** : $S^{(t)} = (S_0^{(t)}, \ldots, S_{\ell-1}^{(t)}) \in \mathbb{F}_2^\ell$ (Def. II-4)
- **Mise à jour** : Récurrence linéaire sur $\mathbb{F}_2$.
- **Polynôme de rétroaction** : $f(X) = 1 \oplus c_1 X \oplus \cdots \oplus c_\ell X^\ell$.
- **Période** : $T = 2^\ell - 1$ (m-suite, si f primitif). (Prop. II-5)

- **Def. II-4 :** LFSR = automate linéaire sur $\mathbb{F}_2$.
- **Prop. II-5 :** Période max $\iff$ polynôme primitif.
- **Sortie :** $z_t = S_0^{(t)}$ (output direct du registre).
- **Limite :** Hardware efficace mais structure algébrique transparente.

université de BORDEAUX

La Linéarité tue la Sécurité

Un LFSR brut est régi par des équations linéaires sur $\mathbb{F}_2$. Son polynôme est reconstructible.

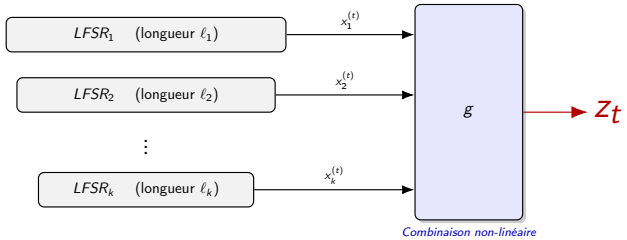
L'Algorithme de Berlekamp-Massey :

- Reconstruit le polynôme minimal $f(X)$ d'une suite récurrente linéaire.
- Complexité : $\mathcal{O}(\ell^2)$ opérations sur $\mathbb{F}_2$.
- Il suffit d'observer 2ℓ **bits** consécutifs de la suite chiffrante z_t pour retrouver $S^{(0)}$ et prédire toute la suite.

Pour vendre une machine "inviolable", Crypto AG devait briser cette transparence algébrique.

- **Réf. cours :** Def. II-8 et Prop. II-9 (Berlekamp-Massey).
- **Coût :** 2ℓ bits observés $\Rightarrow$ reconstruction complète de $f(X)$ et $S^{(0)}$.
- **Verdict :** LFSR brut = sécurité nulle face à adversaire compétent.
- **Transition :** Nécessité d'introduire de la non-linéarité.

La Solution : Générateur à Combinaison



On combine k LFSRs **indépendants** via une fonction non-linéaire g.

Propriétés du Générateur

- **Génération :** $z_t = g(x_1^{(t)}, \ldots, x_k^{(t)})$
- **Période Maximale :** Les ℓ_i sont **premières entre elles**.
- **Résultat :** $T_{tot} = \prod_{i=1}^{k}(2^{\ell_i} - 1)$.

[Modèle : Pornin, SSTIC]

- **Industrie :** k entre 3 et 6 LFSRs ; ASIC compacts.
- **Longueurs ℓ_i :** Premières entre elles $\Rightarrow$ période globale $= \prod(2^{\ell_i} - 1)$, gigantesque.
- **Rôle de g :** Fonction non-linéaire censée rendre Berlekamp-Massey incalculable.
- **Astuce NSA :** g conçue pour paraître robuste, mais immunité de corrélation délibérément sacrifiée.
- **Conséquence :** Biais statistique ϵ introduit $\Rightarrow$ attaque par corrélation (Divide & Conquer) rendue possible.

La Backdoor Statistique de Crypto AG

La NSA conçoit en secret une fonction g **biaisée** gravée en silicium. Le combineur échoue sciemment à satisfaire le critère d'**immunité de corrélation**.

Le Biais Exploitable

Il existe un registre $LFSR_1$ et un biais $\epsilon > 0$ tel que :

$$P(z_t = x_1^{(t)}) = 0.5 + \epsilon$$

Conséquence : La suite chiffrante z_t "fuite" de l'information sur la sortie $x_1^{(t)}$ d'un registre individuel.

Ce biais est invisible à l'usage quotidien, mais statistiquement exploitable avec suffisamment de chiffré.

[Biais ϵ : CCC, Reverse-Engineering 2020]

- **Backdoor :** Violation délibérée de l'immunité de corrélation de g.
- **Façade :** g suffisamment complexe pour résister à Berlekamp-Massey $\Rightarrow$ aspect "sécurisé".
- **Faille cachée :** Immunité de corrélation sacrifiée $\Rightarrow$ biais ϵ exploitable.
- **Stratégie NSA :** Faiblesse statistique dissimulée derrière la complexité apparente de g.
- **"Henry" (Widman) :** Kjell-Ove Widman, mathématicien suédois recruté par la CIA (alias "Henry"), justifiait académiquement les algorithmes affaiblis auprès des ingénieurs suisses ; le haut degré algébrique apparent de g masquait la vulnérabilité statistique lors des revues internes.

L'Attaque : *Divide & Conquer*

université de BORDEAUX

Le biais ϵ permet d'attaquer chaque registre L_i **indépendamment**.

Brute Force (sans backdoor)

$\mathcal{O}(2^{\sum_{i=1}^{k} \ell_i})$

Espace joint
Incalculable (siècles).

Corrélation (Backdoor)

$\mathcal{O}(\sum_{i=1}^{k} 2^{\ell_i})$

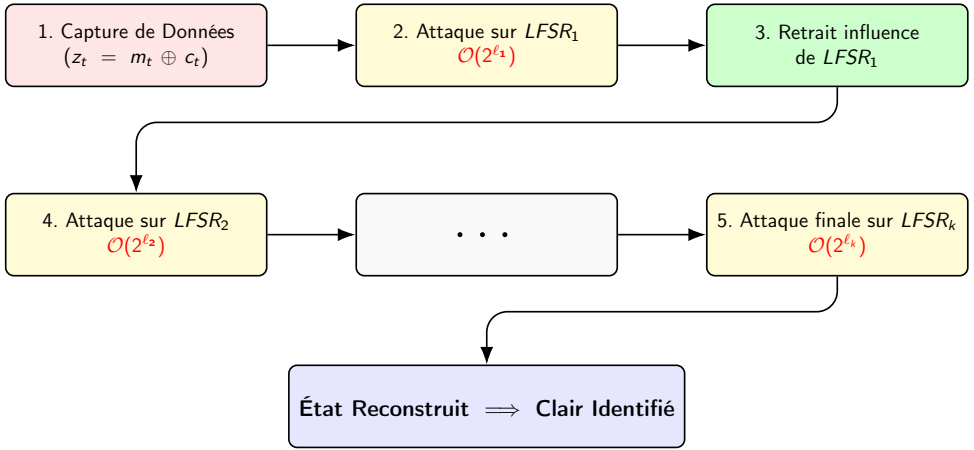
Registres isolés
Quelques secondes.

Méthode : Avec du *clair probable* (en-tête diplomatique, salutation standard), l'attaquant compare statistiquement chaque état candidat de L_1 à la suite chiffrante captée. Le vrai état se démarque par corrélation.

[KPA Methodology : Pornin, SSTIC]

- **Type :** Attaque à clair connu (KPA).
- **Source du clair :** En-têtes régulières télex diplomatiques ("To Mr Ambassador. . .").
- **Récupération :** $m_t \oplus c_t = z_t \Rightarrow$ suite chiffrante extraite.
- **Cascade :** Isoler $LFSR_1$ via biais ϵ_1, soustraire, attaquer $LFSR_2$, etc.
- **Gain :** Exponentielle de la somme $\rightarrow$ somme d'exponentielles.

Visualisation de l'Attaque en Cascade



Complexité Totale : $\mathcal{O}(\sum_{i=1}^{k} 2^{\ell_i}) \ll \mathcal{O}(2^{\sum_{i=1}^{k} \ell_i})$

[Cascade Iteration : CCC, 2020]

- **Principe :** Brise l'exposant (somme des longueurs) en somme linéaire.
- **Exemple :** $k = 6 \Rightarrow$ quelques secondes vs. millénaires en brute-force.
- **Signal purifié :** Chaque étape soustrait l'influence des registres déjà cassés.

1992 : La Faille Humaine (L'Affaire Hans Bühler)

université de BORDEAUX

L'Arrestation en Iran

- Hans Bühler, ingénieur commercial star de Crypto AG, est arrêté à Téhéran en **mars 1992**.
- Interrogé pendant **9 mois** par les services iraniens, libéré en **janvier 1993**.
- Le gouvernement iranien suspecte l'équipement d'être compromis suite à des fuites liées à des assassinats politiques.

L'Opération Démasquée

- Le **BND** paie la rançon/caution de **1 M $** à l'Iran ; la **CIA refuse** de contribuer.
- Ce différend financier provoque le *Divorce Agreement* de 1993 : la CIA rachète la part du BND

Compétence vs. Backdoor

Bühler ignorait la fraude, **mais Menga Caflisch**, ingénieure brillante, a accidentellement **corrigé la backdoor** en optimisant les algorithmes — forçant la CIA à stopper la production.

[Vidéo : Sylvqin, L'Affaire Crypto AG, 2021]

- **Ironie :** Pas un audit crypto qui révèle la faille, mais une erreur humaine.
- **Arrestation :** Mars 1992 ; Hans Bühler arrêté à Téhéran ; Iran suspecte les machines.
- **Interrogatoire :** 9 mois de détention ; Bühler ignorait la fraude.
- **Rançon :** BND paie 1 M$; CIA refuse ⇒ peur de griller la couverture.
- **Divorce 1993 :** CIA rachète part BND pour 17 M$; contrôle exclusif.
- **Fuite médiatique :** Bühler alerte la presse ; lien Zoug–BND découvert.
- **Menga Caflisch :** Ingénieure chez Crypto AG ; en optimisant les algorithmes (son travail normal), elle corrige accidentellement la backdoor NSA.
- **Réaction CIA :** Panique ; arrêt de la production ; machines "corrigées" (donc sécurisées) redirigées vers des banques suisses.
- **Thèse confirmée :** Une backdoor mathématique ne survit pas à un audit interne compétent — "Security by Obscurity" est structurellement condamné.

2020 : La Déclassification et le Washington Post

université de BORDEAUX

Le Secret Révélé (#CRYPTOLEAKS)

- En Février 2020, une enquête conjointe du *Washington Post* (USA), de la *ZDF* (ALL) et de *SRF* (SUI) dévoile l'entièreté du scandale.
- Ils publient des documents de la CIA déclassifiés, prouvant que de 1970 à 1993, la quasi-totalité des communications sécurisées mondiales étaient lues par la NSA.

Le Coup de Maître

- Un rapport interne de la CIA décrit l'opération Rubicon comme "Le coup de maître du renseignement du siècle".

Machine classique Hagelin réputée inviolable.

[Vidéo : Sylvqin, L'Affaire Crypto AG, 2021]

- **Preuve formelle :** Février 2020 ; enquête Washington Post / ZDF / SRF (#CRYPTOLEAKS).
- **Documents CIA :** Déclassifiés ; prouvent contrôle de +40% des flux cryptés mondiaux (1970–1993).
- **Citation CIA :** "Coup de maître du renseignement du siècle".
- **Liquidation :** Crypto AG dissoute en 2018.
- **Cause racine :** Décalage mathématique subtil sur un polynôme de LFSR.

Références Bibliographiques

université de BORDEAUX

- **Support de Cours :**
  - G. Castagnos, *Cours de Cryptologie 2025-2026*, Univ. Bordeaux.
  - Chap. II, Sect. 3 : Chiffrements par flot, LFSR (Def. II-4, Prop. II-5), Berlekamp-Massey (Def. II-8 et Prop. II-9), immunité de corrélation.

- **Sources Historiques & Techniques :**
  - G. Miller, *"The intelligence coup of the century"*, Washington Post, 2020.
  - T. Pornin, *"The Swiss Cheese of Cryptography"*, SSTIC.
  - J. Gressel & CCC, Reverse-Engineering HC-7000, *#CRYPTOLEAKS*, 2020.
  - Sylvqin, *"L'Affaire Crypto AG : la plus grande opération d'espionnage du siècle"*, YouTube, 2021.

- **Fondements maths :** Chap. II (Castagnos) ; Def. II-4, Prop. II-5, Def. II-8, Prop. II-9.
- **Source primaire :** Documents CIA déclassifiés (Washington Post, 2020).
- **Technique :** Reverse-engineering CCC (Leipzig, 2020).

Questions ?

"Trust, but Verify."

– **Ronald Reagan**, sommets nucléaires (1987)

Ou plutôt : "Don't trust. Open-Source everything."

- **Preuve définitive :** "Security by Obscurity" est un échec.
- **Risque matériel :** Hardware propriétaire non-audité = backdoor garantie.
- **La leçon :** Seuls les algorithmes publics (AES, NIST) audités résistent.
- **Clôture :** Merci ; questions sur LFSR, corrélation ou contexte géopolitique bienvenues.