

# TP de sécurité des systèmes embarqués

Hugues de Valon

Paul Luperini

Lucas Mahieu

27 janvier 2017

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>TP 1</b>	<b>3</b>
2.1	Introduction . . . . .	3
2.2	Quelle protections sont mises en place contre les attaques par fautes ? . . . .	3
2.3	Quelles sont les faiblesses de cette sécurité ? . . . . .	3
2.4	Implémentation de l'attaque par faute . . . . .	4
2.5	Embarcation du code . . . . .	4
2.6	Conclusion . . . . .	5
<b>3</b>	<b>TP 2</b>	<b>5</b>
3.1	Introduction . . . . .	5
3.2	Théorie . . . . .	6
3.3	Travail réalisé . . . . .	6
3.4	Résultats . . . . .	6
3.5	Conclusion . . . . .	6
<b>4</b>	<b>Conclusion Générale</b>	<b>7</b>

## 1 Introduction

De nos jours, le chiffrement de données est essentiel pour assurer la sécurité des transferts de données et préserver la sécurité d'un pays, d'une entreprise ou la vie privée d'un individu.

L'algorithme AES (Advanced Encryption Standard) est un algorithme très utilisé en chiffrement des données car réputé incassable. Néanmoins, nous allons voir, au travers de deux exemples réalisés en travaux pratiques, que cette sécurité dépend grandement de l'implémentation qu'il en est fait dans un circuit électronique.

Dans un premier temps, nous allons réaliser une attaque par injection de fautes sur un circuit AES utilisant une protection par redondance d'informations. Ensuite nous réaliserons une attaque par canaux auxiliaires (Differential Power Analysis) sur un circuit AES n'ayant aucune protection spéciale.

## 2 TP 1

### 2.1 Introduction

Dans ce premier TP nous allons mettre en évidence qu'avec une protection trop simple il est relativement simple d'obtenir des informations lors d'un chiffrement de données sensibles.

Durant ce TP, le code source d'une IP d'un AES nous est fournie. Celle-ci permet de chiffrer ou déchiffrer un message à partir d'une clé secrète. Nous allons donc simuler l'injection d'une faute par un laser sur le "*chemin*" emprunter par les données lors des multiples rondes de l'AES. Pour rester réaliste, nous feront un *bit-flip* 8 bits (1 octet) une et une seule fois.

### 2.2 Quelle protections sont mises en place contre les attaques par fautes ?

Bien que l'algorithme de l'AES soit incassable aujourd'hui, son implémentation peut permettre de récupérer des données sensibles par de nombreux moyens. Dans ce TP, on s'intéresse à une potentielle attaque par injection de fautes et à une contre-mesure de cette attaque. Pour mener une attaque par faute dans ce module AES, nous avons tout d'abord analysé le circuit et tenté de comprendre comment le système était protégé.

La sécurité du chiffrement tel qu'il est implémenté pour ce TP réside dans la redondance d'information. En effet, chaque calcul sur les octets du `data_unit` sont fait 2 fois, cela permet, à l'issue des deux calculs, de comparer que les 2 résultats sont identiques. Dans ce cas, aucune faute ne sera détectée. En revanche, si l'un des deux calculs ne donne pas le même résultat, un flag sera levé, et le calcul sera considéré comme erroné.

De plus, il est possible de doubler le nombre de calculs effectué par round, sans pour autant doubler le temps de calculs. En effet, d'après la figure ?? page ?? montre que durant les 6 premiers cycles 12 calculs sont effectués (sur fronts montant et descendant) et sur les 6 cycles suivants, les mêmes calculs sont à nouveau effectués. Ainsi si l'assaillant change une donnée du circuit, le calcul fait sur les 6 premiers cycles et celui fait sur les 6 derniers seront surement différents et une erreur sera levée.

### 2.3 Quelles sont les faiblesses de cette sécurité ?

Le problème avec cette façon de sécuriser l'AES est que si l'on change la valeur d'un octet pendant exactement 6 cycles, la valeur du premier calcul sera identique au deuxième calcul.

Ainsi, il ne sera plus possible de faire remonter l'erreur. Cela permettrait à l'attaquant de faire changer un octet d'un

## 2.4 Implémentation de l'attaque par faute

En utilisant la faiblesse expliquée précédemment, notre implémentation consiste à introduire une faute de retournement de bits sur le port `in_hi`, sur 8 bits, de la colonne 0. Nous nous basons sur un modèle réaliste d'injection de faute où, grâce à un laser, l'attaquant pourrait retourner les 8 bits de ce port.

```
in_hi_sig <= in_hi;
```

```
lin_0_in <= in_hi_sig XOR fault_sig;
```

Le signal `fault_sig` est remonté jusque dans le fichier `top`, comme un port du composant `aes_core`, pour pouvoir générer l'attaque. Grâce au XOR, un bit à 1 dans le signal `fault_sig` retournera le bit correspondant dans le signal `in_hi` et créera une faute. Précisons que nous n'attaquons que la première colonne du `DataUnit` et que ce même signal `fault_sig` est laissé à "00000000" pour les trois autres colonnes.

Nous avons tout d'abord testé cette implémentation en modifiant le test bench VHDL qui instancie notre IP. Nous avons rajouté un process `fault`, qui incrémente un compteur à chaque front montant et qui le remet à zéro à chaque début de chiffrement. Après un certain nombre de cycles, nous injectons la faute de retournement de bit (signal `fault_sig` à "11111111"), pendant exactement 6 cycles afin que les deux registres DDR soient affectés par l'attaque.

En utilisant les données fournies par la publication 197 du FIPS (Federal Information Processing Standard), c'est à dire le texte d'entrée, la clé et le texte chiffré, nous pouvons vérifier que notre implémentation fonctionne. Si c'est le cas, la donnée d'entrée ne doit jamais changer pendant le chiffrement, le signal de sortie de `aes_core`, `error`, ne doit jamais passer à 1 et la donnée de sortie doit être différente de la donnée attendue.

Nous avons obtenu de tels résultats (voir figures 1 et 2) la donnée chiffrée, n'est pas celle attendue, le signal `s_broken` reste toujours à 0 et la donnée en entrée ne change pas. On peut aussi voir que le signal modélisant le retournement de bit, `fault_sig`, n'est actif que sur 6 cycles.

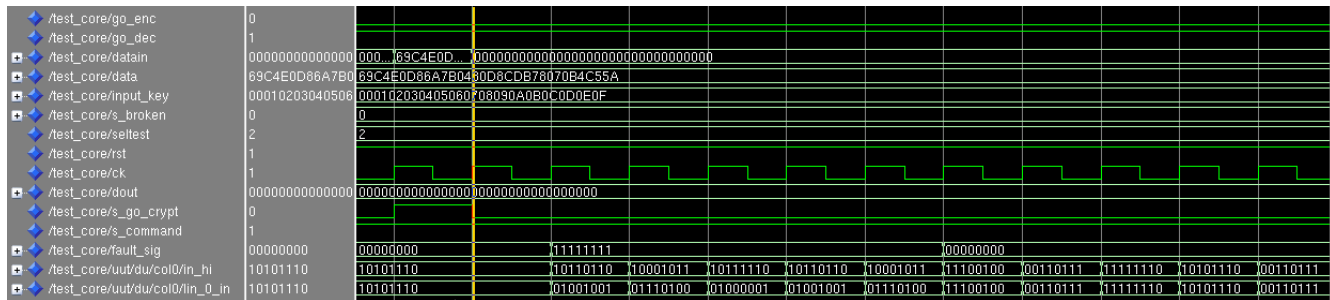


FIGURE 1 – Simulation de l'attaque par faute (début)

## 2.5 Embarcation du code

Nous avons embarqué notre IP dans un design développé par l'outil Xilinx EDK et du code embarqué sur un processeur MicroBlaze. Nous avons tout d'abord testé le comportement normal sans faute. Un petit morceau logiciel permet de configurer l'IP grâce à différents registres : la clé, le texte et le mode choisi (chiffrement/déchiffrement). L'IP repère les fronts montants sur certains bits de registres pour charger la clef/lancer le processus. La figure 3 nous montre ce fonctionnement normal avec les mêmes données du FIPS.

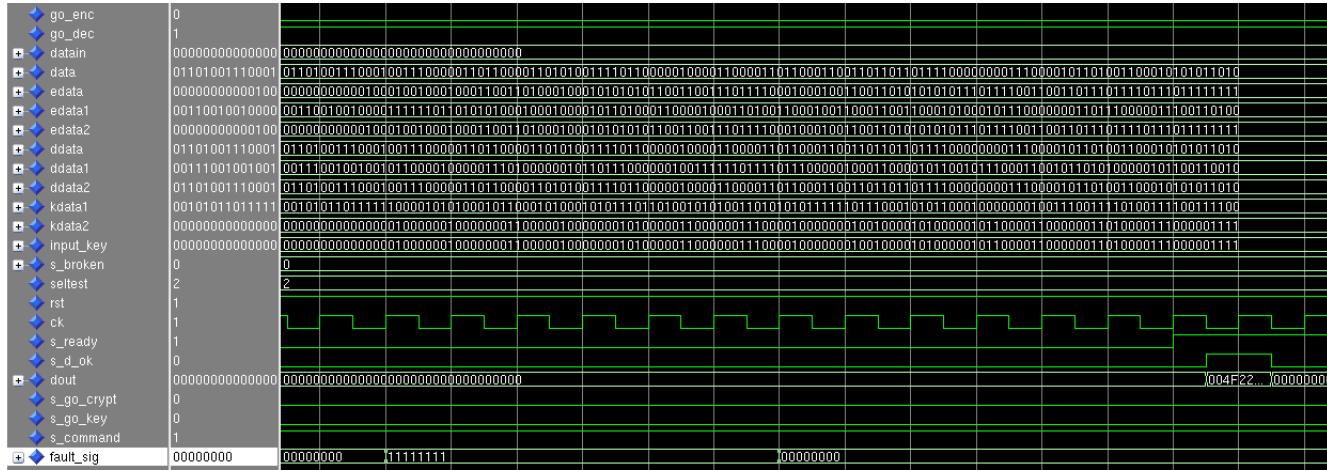


FIGURE 2 – Simulation de l'attaque par faute

Pour simuler l'erreur, on utilise le même process VHDL que dans le test bench mais dans

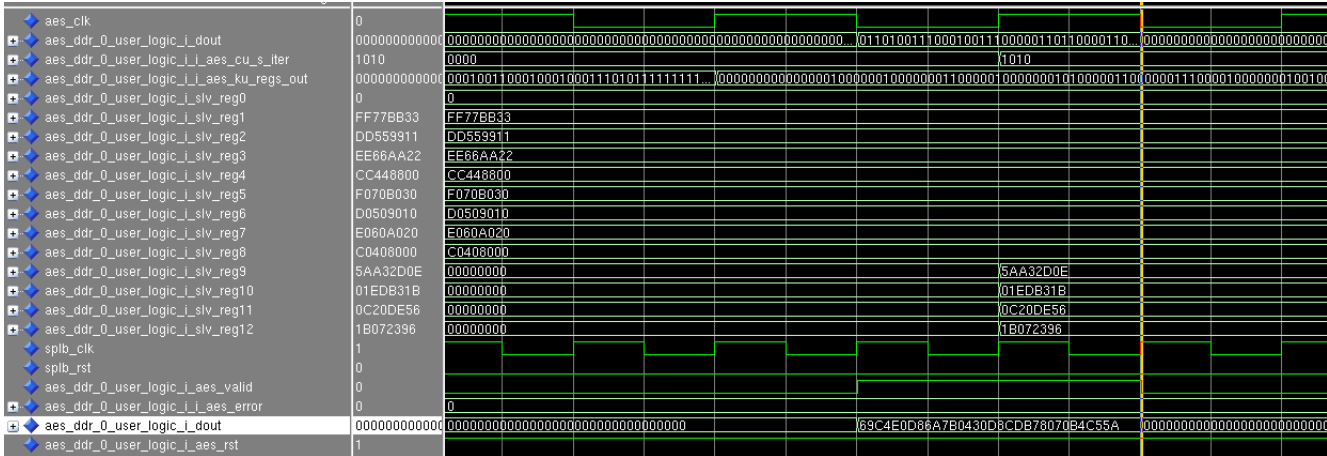


FIGURE 3 – Simulation de l'IP embarquée

le fichier `user_logic.vhd`. Ce process est aussi déclenché avec un front montant sur un bit d'un registre.

## 2.6 Conclusion

Ce TP était une bonne occasion de découvrir de façon pratique une attaque d'un système embarqué, l'attaque par injection de faute. Il nous a aussi permis de mieux comprendre le fonctionnement interne de l'algorithme AES.

## 3 TP 2

### 3.1 Introduction

Dans cette partie nous allons effectuer une attaque par canaux auxiliaires sur un chiffrement AES. Cette attaque s'appelle Differential Power Analysis ou DPA, et consiste à étudier

la consommation électrique du système visé sur de multiples exécutions et d'en déduire par des procédés statistiques l'information visée, ici la clé de chiffrement.

### 3.2 Théorie

La sécurité d'un système de chiffrement dépend de l'algorithme employé et de son implémentation sur circuit électronique. Dans le cas de la DPA, nous allons utiliser des faiblesses d'implémentations pour en déduire la clé de chiffrement employée.

La SBox (Substitution Box) est le composant non linéaire principal de l'AES. Il s'agit d'une substitution d'octets, cette opération est effectuée juste après l'ajout de la clé à la donnée que l'on veut chiffrer. Il est donc possible, à partir du résultat de la première itération de l'AES qui ne dépendent que des données d'entrées et de la clé, de retrouver la clé.

La DPA est une attaque par canaux cachés qui utilisent la consommation électrique du circuit pour valider ou invalider des hypothèses sur la clé. La consommation d'un circuit logique dépend grandement des données traitées. Dans notre cas, il n'y a pas de contre-mesure spécifique utilisée pour équilibrer la consommation. Ainsi, nous devrions être capables de réaliser une attaque DPA sur la SBox de l'AES. Néanmoins, nous n'attaquerons pas la totalité de la clé mais un seul octet, pour des questions de temps de calcul.

### 3.3 Travail réalisé

Tout d'abord, nous devons transformer les fichiers VHDL qui nous ont été donnés en une description au niveau des transistors, pour pouvoir en extraire une consommation électrique simulée. Cette étape est réalisée à l'aide de l'environnement Cadence.

Une fois cette description générée, nous utilisons le simulateur de consommation électrique Synopsis Nanosim pour obtenir les profils de courants selon certains stimuli.

La figure 4 page 7 contient les simulations de courants pour différents stimuli (la première image pour 0, la deuxième 57 et la dernière 255) pour une certaine clé de chiffrement AES. On remarque de légères différences, qui seront exploitées par la DPA.

Le logiciel d'analyse DPA fourni nous permet de retrouver les clés utilisées. Il accepte deux paramètres : l'index du bit attaqué et le chemin vers le dossier contenant les fichiers de simulation. L'outil lit un fichier de configuration contenant une liste des vecteurs qui seront utilisés pour la DPA. Ensuite, les données simulées sont collectées à partir des fichiers de simulation. Pour chaque hypothèse de clé, il partitionne les traces de simulation de chaque message selon la valeur du bit attaqué. Enfin, il évalue les différences entre les moyennes de chaque partition et sélectionne la valeur la plus haute.

### 3.4 Résultats

Suite à nos expérimentations nous obtenons les résultats suivants visibles sur la figure 5 page 9.

Pour obtenir la clé qui a le plus de chances d'être la clé réelle, il suffit de prendre celle qui apparaît le plus souvent sur les différents lancements du programme avec des bits différents.

Par exemple dans le cas de la clé 4A, celle qui apparaît le plus souvent est la 58 (0b111010).

### 3.5 Conclusion

Dans ce TP, nous avons vu comment réaliser une attaque par canaux cachés DPA, et obtenir la clé de chiffrement. Pour se protéger de telles attaques, il faut rendre la consommation de courant insensible aux données d'entrée afin d'équilibrer la consommation de courant, et rendre inutile la DPA qui se base sur les différences. Néanmoins, en pratique cela reste très compliqué, car la plus légère différence peut être une faiblesse exploitable.

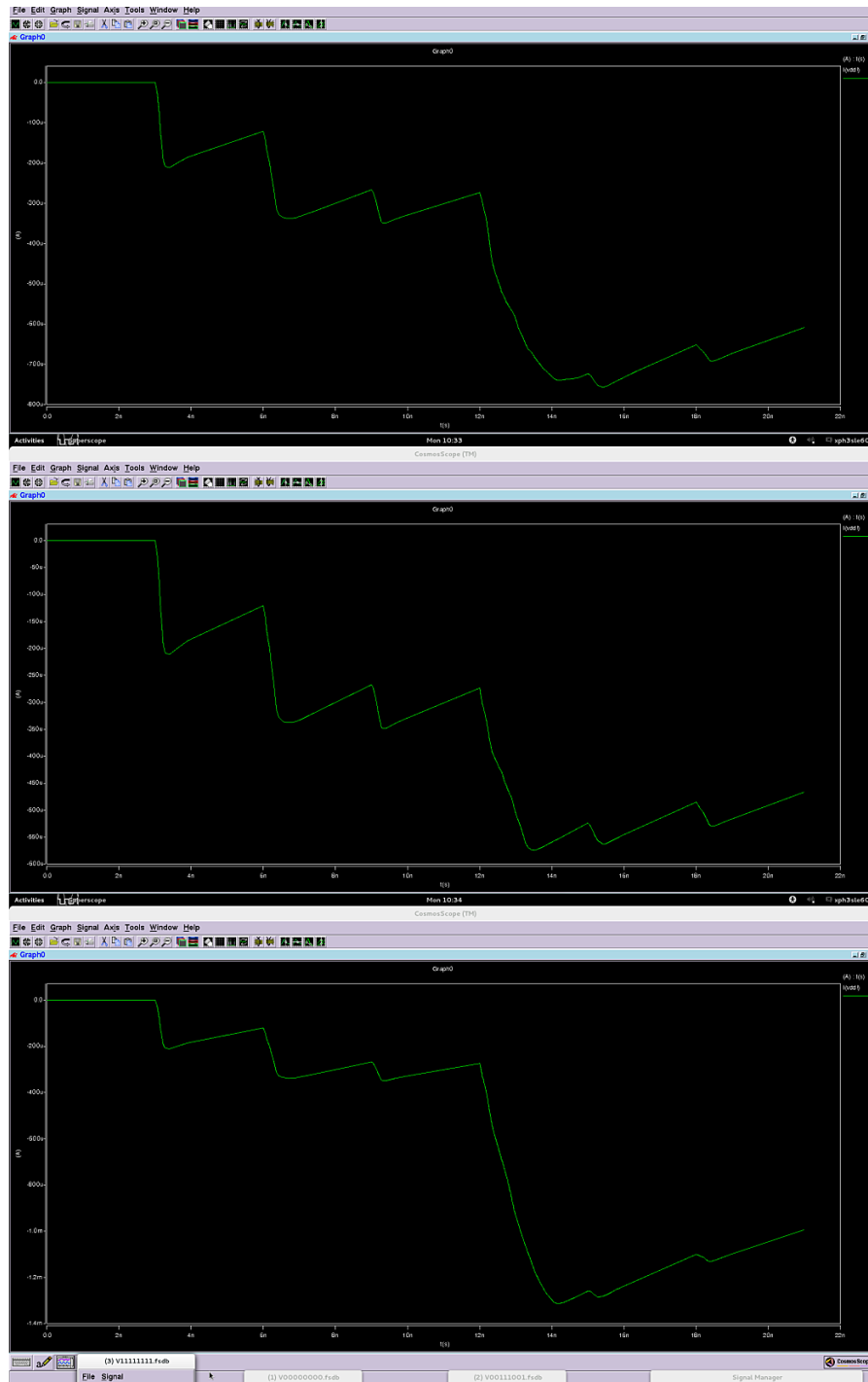


FIGURE 4 – Traces de courants pour différents stimuli

## 4 Conclusion Générale

Durant les séances de travaux pratiques, nous avons mis en évidence deux attaques classiques sur des circuits électroniques implémentant l'algorithme AES : l'attaque par injection

de fautes et la DPA.

Cet algorithme, pourtant réputé incassable, devient très vulnérable dès qu'il est implémenté dans un circuit électronique sans aucun moyen de sécurisation. Il est donc essentiel de prendre en compte la sécurité d'un circuit dès le début de sa conception, et de choisir les bonnes contre-mesures qui préservent la sécurité du chiffrement tout en ne négligeant pas les performances.



```

% bash unknown_rapid_dpa.sh
UnknownKey4A/:
bit 0: Maximum observed for Key = 58.
bit 1: Maximum observed for Key = 58.
bit 2: Maximum observed for Key = 58.
bit 3: Maximum observed for Key = 58.
bit 4: Maximum observed for Key = 58.
bit 5: Maximum observed for Key = 215.
bit 6: Maximum observed for Key = 58.
bit 7: Maximum observed for Key = 58.
UnknownKey4B/:
bit 0: Maximum observed for Key = 110.
bit 1: Maximum observed for Key = 110.
bit 2: Maximum observed for Key = 110.
bit 3: Maximum observed for Key = 110.
bit 4: Maximum observed for Key = 110.
bit 5: Maximum observed for Key = 131.
bit 6: Maximum observed for Key = 110.
bit 7: Maximum observed for Key = 110.
UnknownKey4C/:
bit 0: Maximum observed for Key = 155.
bit 1: Maximum observed for Key = 155.
bit 2: Maximum observed for Key = 155.
bit 3: Maximum observed for Key = 155.
bit 4: Maximum observed for Key = 155.
bit 5: Maximum observed for Key = 118.
bit 6: Maximum observed for Key = 155.
bit 7: Maximum observed for Key = 155.
UnknownKey4D/:
bit 0: Maximum observed for Key = 184.
bit 1: Maximum observed for Key = 143.
bit 2: Maximum observed for Key = 184.
bit 3: Maximum observed for Key = 184.
bit 4: Maximum observed for Key = 184.
bit 5: Maximum observed for Key = 85.
bit 6: Maximum observed for Key = 184.
bit 7: Maximum observed for Key = 184.
UnknownKey4E/:
bit 0: Maximum observed for Key = 239.
bit 1: Maximum observed for Key = 239.
bit 2: Maximum observed for Key = 239.
bit 3: Maximum observed for Key = 239.
bit 4: Maximum observed for Key = 239.
bit 5: Maximum observed for Key = 2.
bit 6: Maximum observed for Key = 239.
bit 7: Maximum observed for Key = 239.

```

FIGURE 5 – Résultats de l'attaque DPA sur l'ensemble de données du groupe 4