

**Mater Cybersecurity**

Master of Science in Informatics at Grenoble

Master Informatique / Master Mathématiques & Applications

# Randomisation des nombres dans l'exponentiation modulaire

**Amiot Simon**

27 juin 2017

Research project performed at *Imaths*

Under the supervision of:

Nicolas Méloni, *Imaths*

Defended before a jury composed of:

[Prof/Dr/Mrs/Mr] <first-name last-name>

[Prof/Dr/Mrs/Mr] <first-name last-name>

[Prof/Dr/Mrs/Mr] <first-name last-name>

[Prof/Dr/Mrs/Mr] <first-name last-name>



## **Résumé**

Le premier objectif de ce stage est de proposer une implémentation logicielle d'un algorithme décrit dans un article pensé et rédigé par Nicolas Méloni, mon superviseur pour ce stage. L'algorithme a pour but de recoder l'exposant dans l'exponentiation modulaire afin de rendre sa représentation aléatoire et efficace.

Le deuxième objectif de ce stage est de généraliser le concept et l'algorithme de l'article à la double exponentiation.

## **Résumé**

Dans une première partie, une brève introduction explicite l'exponentiation modulaire et son utilisation dans plusieurs protocoles essentiels en cryptographie.

La deuxième partie explique l'état de l'art du recodage

La troisième partie introduit la double exponentiation, et les différentes méthodes de recodage existantes.

La quatrième partie est constituée de l'analyse du problème et de l'approche de la solution.

La cinquième partie concerne l'implémentation de la solution trouvée dans la partie précédente.

La sixième partie traite de l'étude statistique de l'algorithme et de son efficacité d'un point de vue sécurité et d'un point de vue performance.

La septième partie est une étude sur les paramètres de l'algorithme.



# Table des matières

<b>Résumé</b>	<b>i</b>
<b>Résumé</b>	<b>i</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
<b>2 Représentation aléatoire de l'exposant</b>	<b>3</b>
2.1 State of the art...	3
2.2 Randomisation et Optimisation	5
<b>3 Etat de l'art de la double exponentiation</b>	<b>13</b>
3.1 L'approche de Shamir	13
3.2 L'approche de Solinas et la <i>JSF</i>	14
<b>4 Approche du problème</b>	<b>17</b>
4.1 La représentation d'un couple d'exposants	17
4.2 La méthode <i>DoubleRDR</i>	19
4.3 Exemple et Contraintes	23
<b>5 Théorie, Implémentation et Optimisation</b>	<b>27</b>
5.1 Implémentation de la <i>DoubleRDR</i>	27
5.2 De l'arithmétique à l'optimisation	32
5.3 Equivalence et preuve	35
<b>6 Performances et Aléatoire : l'importance des coefficients</b>	<b>39</b>
6.1 L'important choix des coefficients	39
6.2 Liens entre les coefficients	41
6.3 Généralisation et Théorie	44
<b>7 Conclusion</b>	<b>45</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>47</b>



# Introduction

L'exponentiation modulaire est un algorithme au coeur d'un grand nombre de protocole en cryptographie, notamment pour le RSA ou ECC.

## L'exponentiation modulaire et le RSA

Dans le protocole RSA, l'exponentiation modulaire joue un rôle central. Voici les étapes du chiffrement et du déchiffrement RSA :

- 1) Choisir  $p$  et  $q$ , deux nombres premiers distincts.
- 2) Calculer leur produit  $n = pq$ , appelé *module de chiffrement*.
- 3) Calculer  $\phi(n) = (p - 1)(q - 1)$ .
- 4) Choisir un entier naturel  $e$  premier avec  $\phi(n)$  et strictement inférieur à  $\phi(n)$ , appelé *exposant de chiffrement*.
- 5) Calculer l'entier naturel  $d$ , inverse de  $e$  modulo  $\phi(n)$ , et strictement inférieur à  $\phi(n)$ , appelé *exposant de déchiffrement*.

Pour toutes ces étapes, l'exponentiation modulaire n'intervient pas.

Cependant pour chiffrer un message  $M$ , représenté par un entier naturel strictement inférieur à  $n$ , il faut calculer  $C \equiv M^e \pmod{n}$ .

Le déchiffrement de  $C$  nécessite également une exponentiation modulaire, pour retrouver le message clair, il faut calculer  $M \equiv C^d \pmod{n}$ .

Dans le protocole RSA, l'exponentiation modulaire a une place importante (à la fois dans le chiffrement et dans le déchiffrement), cependant il y a d'autres protocoles pour lesquels l'exponentiation est requise, comme par exemple le protocole basé sur les courbes elliptiques appelé ECC.

Il est toutefois important de signaler que dans le groupe des courbes elliptiques, les opérations sont différentes, les multiplications du RSA deviennent des additions pour ECC, et l'exponentiation modulaire correspond à la multiplication scalaire pour le protocole ECC.

La différence principale entre le protocole RSA et le protocole ECC est la suivante :

- L'opposé d'un point  $P$ , noté  $-P$ , est facile à calculer pour ECC (négligeable comparé à l'addition de points),

- l'inverse d'un entier naturel  $m$  modulo  $n$ , noté  $m^{-1}$ , est coûteuse en temps de calcul pour RSA (plus coûteuse que la multiplication modulaire).

### Les premiers algorithmes d'exponentiation

Pour implémenter l'exponentiation, il existe deux principales méthodes générales : les algorithmes *Left-To-Right* et *Right-To-Left*. Dans ce stage, nous avons choisi de traiter l'algorithme *Left-To-Right*.

---

#### Algorithm 1 Algorithme Left-To-Right

---

**Require:**  $x, N$  et  $k$  avec  $k = [k_0, k_1, \dots, k_n]$  with  $k_i \in \{0, 1\}$

**Ensure:**  $x^k \bmod N$

$S \leftarrow 1$

**for**  $i$  from  $n$  to  $0$  **do**

$S \leftarrow S \times S \bmod N$

**if**  $k_i = 1$  **then**

$S \leftarrow S \times x \bmod N$

**end if**

**end for**

---

Cet algorithme est un algorithme de base permettant de comprendre le processus d'exponentiation, et de voir que l'exponentiation dépend essentiellement de la représentation binaire du secret  $k$ , et en particulier du poids de Hamming (nombre de 1) de la représentation. Ici, la représentation choisie est la décomposition canonique en base 2 de  $k$  avec coefficients valant soit 0, soit 1. Cependant, nous allons voir par la suite qu'il existe d'autres représentations présentant des avantages intéressants.



## Représentation aléatoire de l'exposant

### 2.1 State of the art...

Afin d'améliorer l'efficacité de l'exponentiation, il est possible de précalculer certaines valeurs et de changer la représentation de l'exposant en fonction de ces nombres. La première partie explicite l'algorithme d'exponentiation basé sur le précalcul, puis les parties suivantes donnent 3 méthodes différentes de représentation.

#### 2.1.1 Précalcul et Exponentiation

Soit  $\mathcal{G}$  un groupe et  $\mathcal{D}$  un ensemble d'entiers positifs impairs. Soit  $k = (k_{l-1} \dots k_0)_2$  un entier, où les  $k_i$  sont des éléments de  $\mathcal{D}$ , et soit  $g \in \mathcal{G}$ . L'algorithme est en deux étapes :

- 1) Calculer  $g^d$ , où  $d$  sont les éléments de  $\mathcal{D}$
- 2) Si  $k_i \neq 0$ , multiplier par l'élément précalculé  $g^{k_i}$

---

#### Algorithm 2 Algorithme d'exponentiation avec précalcul

---

**Require:** un élément  $g$ , un entier  $N$  positif, un entier  $k$  avec  $k = (k_{l-1}, k_1, \dots, k_n)$  with  $k_i \in \mathcal{D}$

**Ensure:**  $g^k \bmod N$

$S \leftarrow 1$

**for**  $i$  from  $n$  to 0 **do**

$S \leftarrow S \times S \bmod N$

**if**  $k_i \neq 0$  **then**

$S \leftarrow S \times g^{k_i} \bmod N$

**end if**

**end for**

---

A la différence de l'algorithme classique, on multiplie par une valeur  $g^{k_i}$  qui dépend de la valeur du bit numéro  $i$  lorsque celui est non nul (dans l'algorithme classique on a  $\mathcal{D} = \{1\}$ , et donc le seul élément précalculé est  $g^1 = g$ , c'est donc l'élément que l'on multiplie à chaque bit non nul).

### 2.1.2 Représentation NAF (Non Adjacent Form)

La représentation NAF est l'unique représentation d'un nombre en entiers relatifs pour laquelle le poids de Hamming est minimal.

**Exemple 1.** Le nombre 7 s'écrit comme :

$$\begin{aligned} (0 \ 1 \ 1 \ 1)_2 &= 4 + 2 + 1 = 7 \\ (1 \ 0 \ -1 \ 1)_2 &= 8 - 2 + 1 = 7 \\ (1 \ -1 \ 1 \ 1)_2 &= 8 - 4 + 2 + 1 = 7 \\ (1 \ 0 \ 0 \ -1)_2 &= 8 - 1 = 7 \end{aligned}$$

La représentation NAF de 7 est la dernière

$$(1 \ 0 \ 0 \ -1)_2$$

### 2.1.3 Représentation wNAF (window Non Adjacent Form)

L'idée est de recoder l'exposant avec d'autres coefficients que  $-1, 0$  et  $1$  en ajoutant tous les nombres impairs inférieurs à  $2^w$  avec  $w$  appelée la taille de la fenêtre.

Soit  $\mathcal{B} = \{1, 3, \dots, 2^w - 1\}$ , la représentation wNAF de  $k$  est l'unique représentation de  $k$  telle que :

$$k = (b_n \ \dots \ b_1 \ b_0)_2$$

où  $b_i \in \mathcal{B} \cup (-\mathcal{B}) \cup \{0\}$ , c'est-à-dire  $b_i$  peut être égal à 0, un élément de  $\mathcal{B}$  ( $1, 3, \dots$ ) ou à l'opposé d'un élément de  $\mathcal{B}$  ( $-1, -3, \dots$ ).

Et ainsi  $k$  vérifie :

$$k = \sum_{i=0}^n b_i 2^i$$

L'utilité de cette représentation est de réduire le poids de Hamming de la représentation de  $k$ , et de ce fait réduire le temps de calcul de  $x^k \bmod N$ .

**Exemple 2.** Le nombre 88 s'écrit comme :

$$(1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0)_2 = 64 + 16 + 8 = 88$$

Pour calculer la représentation 3NAF de 88, il faut définir  $\mathcal{B} = \{1, 3, 5, 7\}$ . En regarder les 3 premiers bits de poids fort de 88, on peut remplacer  $(101)_2$  par 5, puis en regardant les 3 suivants, puis à nouveau les suivants, on remarque qu'on ne peut pas remplacer les coefficients, on obtient donc :

$$(5 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0)_2 = 5 \times 16 + 8 = 88$$

### 2.1.4 Fractional Windows

Cette méthode consiste à adapter la taille de  $w$  au fil de l'algorithme. La taille de la fenêtre (3 dans l'exemple précédent) n'est plus fixée, elle est adaptée au fil de l'algorithme afin d'optimiser la vitesse et les calculs de l'algorithme d'exponentiation.

## 2.2 Randomisation et Optimisation

La partie précédente a présenté les bases et prérequis pour la compréhension de l'article de Nicolas Méloni. La partie suivante s'intéresse à la méthode d'exponentiation modulaire expliqué dans l'article, et à un moyen d'implémenter cette méthode le plus efficacement possible. L'idée de la méthode est de recoder de manière aléatoire l'exposant (secret).

Dans la première section, est expliquée la méthode de randomisation détaillée dans son article, puis la deuxième section détaille l'implémentation de cette méthode et l'optimisation de l'algorithme trouvé, finalement la troisième partie correspond à la démonstration de la validité de cet algorithme.

### 2.2.1 Randomisation dans l'algorithme de Fractional Windows

L'idée de l'algorithme de recodage de l'exposant  $k$  est de changer à chaque exécution de système de codage, et plus particulièrement de changer l'ensemble des coefficients  $\mathcal{D}$ .

Soit  $k$  l'exposant,  $N$  le modulo et  $x$  le message. On pose  $\mathcal{D} = \{d_1, \dots, d_l\}$  où  $d_l$  sont des entiers positifs impairs.

Le premier constat révélé dans l'article est que pour pouvoir recoder la totalité des exposants, il faut nécessairement que 1 soit dans  $\mathcal{D}$ .

#### La fonction *digit*

Soit  $w > 0$  un entier. Pour tout entier  $x$  on définit  $p_w(x) = x \bmod 2^w$ . Puis on pose  $\mathcal{D}_w = p_w(\mathcal{D})$  et  $\overline{\mathcal{D}_w} = \mathcal{D}_w \cup \{2^w - d : d \in \mathcal{D}_w\}$ . Finalement on définit  $W_n = \lfloor \log_2(\max_i(d_i)) \rfloor$ .

Pour construire la fonction *digit*, on doit d'abord définir, pour tout  $k$  entiers  $k$ ,  $w_{\max}(k)$  comme le plus grand nombre  $w \leq W_n + 2$  tel qu'il existe un élément  $d_i \in \mathcal{D}$  qui satisfait ces deux conditions :

1.  $d_i < k$ ,
2.  $p_w(k) \in \overline{\mathcal{D}_w}$

Finalement, la fonction  $digit_{\mathcal{D}} : \mathbb{N} \rightarrow \overline{\mathcal{D}} \cup \{0\}$  est définie par :

- si  $k$  est pair :  $digit(k) = 0$ ,
- si  $k$  est impair :
  - on pose  $W_{\max} = w_{\max}(k)$
  - si  $p_{W_{\max}}(k) \in \mathcal{D}_{W_{\max}}$ ,  $digit_{\mathcal{D}}(k) = d$  avec  $d < k$  tel que  $p_w(k) = p_w(d)$
  - si  $2^{W_{\max}} - p_{W_{\max}}(k) \in \mathcal{D}_{W_{\max}}$ ,  $digit_{\mathcal{D}}(k) = -d$  avec  $d < k$  tel que  $2^{W_{\max}} - p_w(k) = p_w(d)$

La fonction *digit* est bien définie pour tout  $k$  dans  $\mathbb{N}$ . De plus, on peut remarquer que  $1 \in \mathcal{D}$ , ce qui implique que  $1 \in \mathcal{D}_w$  pour tout  $w$ , et donc  $W_{\max} \geq 2$ .

Voici un exemple simple pour bien comprendre la fonction *digit* :

**Exemple 3.** On pose  $k = 101$  et  $\mathcal{D} = \{1, 3, 9\}$ , on a donc  $W_n = 3$ .

Pour calculer la fonction *digit*, il faut d'abord déterminer  $w_{\max}(k)$ .

On pose  $w = W_n + 2 = 5$ , on calcule  $p_w(k) = 101 \bmod 2^5 = 5 \bmod 32$ .

Puis on calcule  $\overline{\mathcal{D}_w} = \{1, 3, 9, 32 - 1, 32 - 3, 32 - 9\} = \{1, 3, 9, 31, 29, 23\}$ .

On vérifie si  $5 \in \overline{\mathcal{D}_w}$ , ce n'est pas le cas, donc on pose  $w = 4$  et on recommence le processus.

On a  $p_w(k) = 5 \bmod 16$ .

Puis on calcule  $\overline{\mathcal{D}_w} = \{1, 3, 9, 15, 13, 7\}$ .

On a  $5 \notin \overline{\mathcal{D}_w}$ , donc on pose  $w = 3$ .

On a  $p_w(k) = 5 \bmod 8$ .

Puis on calcule  $\overline{\mathcal{D}_w} = \{1, 3, 9 \bmod 8, 8 - 1, 8 - 3, 8 - 9 \bmod 8\} = \{1, 3, 5, 7\}$ .

On a  $5 \in \overline{\mathcal{D}_w}$ , donc on a  $w_{\max}(k) = 3$ . On pose  $W_{\max} = w_{\max}(k)$ .

Ici, on est dans le cas où  $k$  est impair, et  $2^{W_{\max}} - p_{W_{\max}} \in \overline{\mathcal{D}_{W_{\max}}}$ , donc on a  $\text{digit}_{\mathcal{D}}(k) = -3$  car  $2^{W_{\max}} - p_w(k) = 2^3 - 5 = 3$ .

## L'algorithme de représentation

Une fois la fonction *digit* définie, l'algorithme de la représentation est le suivant :

---

### Algorithm 3 Représentation aléatoire de $k$

---

**Require:** Un entier  $k$  et un ensemble  $\mathcal{D} = \{1, d_2, \dots, d_n\}$

**Ensure:**  $k = (k_i k_{i-1} \dots k_1 k_0)_2$ ,  $k_i \in \overline{\mathcal{D}} \cup \{0\}$

$i \leftarrow 0$

**while**  $k! = 0$  **do**

$k_i \leftarrow \text{digit}_{\mathcal{D}}(k)$

$k \leftarrow \frac{k - k_i}{2}$

$i \leftarrow i + 1$

**end while**

**return**  $(k_{i-1} \dots k_0)$

---

## Première implémentation

Le coeur de l'implémentation de la représentation réside dans celle de la fonction *digit*. Voici l'algorithme avec lequel j'ai implémenté la fonction *digit* au premier essai :

Il est composé de deux parties :

1) Un algorithme qui calcule  $i$  tel que  $p_{W_{\max}}(k) = p_{W_{\max}}(d_i)$  où  $d_i \in \overline{\mathcal{D}}$ .

2) L'algorithme de la fonction

1) L'idée est de partir de la fenêtre de longueur maximale  $w = W_n + 2$  et de chercher dans  $\overline{\mathcal{D}_w}$  si  $p_w(k)$  est dedans, s'il n'y est pas on diminue  $w$  jusqu'à trouver  $p_w(k)$ .

On conviendra que, d'après l'algorithme,  $i$  est nécessairement compris entre 0 et  $2\#D - 1$

2) A partir de cet algorithme, je peux désormais construire l'algorithme qui calcule la fonction *digit*.

---

**Algorithm 4** Calculer  $i$  tel que  $p_{W_{max}}(k) = p_{W_{max}}(d_i)$

---

**Require:** Un entier  $k$ , le nombre  $W_n$  et un ensemble  $\mathcal{D} = \{1, d_2, \dots, d_n\}$

**Ensure:**  $i$  tel que  $p_{W_{max}}(k) = p_{W_{max}}(d_i)$  où  $d_i \in \overline{\mathcal{D}}$

```
 $c = 0$   
 $w \leftarrow W_n + 2$   
while  $w > 1$  et  $c \neq 1$  do  
   $\overline{\mathcal{D}}_w \leftarrow p_w(\overline{\mathcal{D}})$   
   $p_k = p_w(k)$   
   $i = 0$   
  while  $c \neq 1$  et  $i < 2 \times \#D$  do  
    if  $p_k = \overline{\mathcal{D}}_w[i]$  then  
       $c \leftarrow 1$   
    end if  
     $i \leftarrow i + 1$   
  end while  
   $w \leftarrow w - 1$   
end while  
return  $i - 1$ 
```

---

---

**Algorithm 5** Calculer  $digit_{\mathcal{D}}(k)$

---

**Require:** Un entier  $k$ , le nombre  $W_n$  et un ensemble  $\mathcal{D} = \{1, d_2, \dots, d_n\}$

**Ensure:**  $digit_{\mathcal{D}}(k)$

```
 $digit \leftarrow 0$   
if  $k$  est impair then  
   $i = algorithm4(k, W_n, \mathcal{D})$   
  if  $i < \#D$  then  
     $digit \leftarrow \mathcal{D}[i]$   
  else  
     $digit \leftarrow -\mathcal{D}[i - taille]$   
  end if  
end if  
return  $digit$ 
```

---

### 2.2.2 Optimisation de l'algorithme

L'idée de l'optimisation est de réduire l'appel à la fonction de recherche d'élément dans un tableau dans *Algorithm 4*. Rechercher dans un tableau ou une table (ou un ensemble) est chronophage en programmation, ainsi pour réduire le temps et le coût d'exécution de la représentation, nous avons pensé à un autre algorithme. Notre idée est basée sur les trois propositions suivantes :

- Construire un unique tableau d'éléments de  $\mathcal{D}$ .
- L'index du tableau correspond à l'antécédant et la case à l'image de l'index.
- Le remplissage du tableau nécessite uniquement des additions, des multiplications et des modules.

#### *Digit* vue comme un tableau

Afin d'éviter l'appel à une recherche de table, nous avons abordé la fonction *digit* de manière différente, non pas comme une fonction mais comme la composition d'un modulo et d'une fonction défini par un vecteur. L'algorithme de la fonction *digit* suit ces étapes :

- 1) Construction d'un tableau  $D_{max}$  de taille  $2^{W_n+2}$  où  $W_n$  est la taille du plus grand élément de  $\mathcal{D}$
- 2) Remplissage de tableau  $D_{max}$  tel que pour  $i \in \{0, \dots, 2^{W_n+2} - 1\}$ ,  $D_{max}[i] = digit(i)$
- 3) Calcul de  $k_{mod} = k \text{ Mod } 2^{W_n+2}$
- 4) Renvoi de  $D_{max}[k_{mod}] = digit(k)$

#### Construction de $D_{max}$

Avant de calculer et de compléter le tableau  $D_{max}$ , il faut calculer  $W_n$  et  $\overline{\mathcal{D}} = \mathcal{D} \cup (-\mathcal{D})$ .

**Construction de  $D_{max}$  1.** La construction du tableau  $D_{max}$  comporte 3 principales étapes :

- Initialiser toutes les cases à 0 et mettre les éléments de  $\overline{\mathcal{D}}$  à leur place ( $D_{max}[1] = 1$ ,  $D_{max}[23] = 23$ ).
- Pour  $i$  de  $W_n + 1$  à 3, on ajoute  $2^i \times (2l + 1)$  à chaque élément  $\overline{D}$  avec  $0 \leq l < 2^{W_n+2-i-1}$  et on complète le tableau avec ces valeurs.
- On complète les cases impaires qui valent 0 avec 1 ou  $-1$  suivant la case.

### 2.2.3 Preuve

Dans cette partie, nous allons montrer que l'algorithme construit à partir de  $D_{max}$  calcule la fonction *digit*

---

**Algorithm 6** Calculer  $D_{max} = [1, d_i, \dots, d'_i]$  avec  $d_i, d'_i \in \overline{\mathcal{D}}$

---

**Require:**  $W_n$  et  $\mathcal{D}$

**Ensure:**  $D_{max} = [1, d_i, \dots, d'_i]$  avec  $d_i, d'_i \in \overline{\mathcal{D}}$

```
sizeD  $\leftarrow |D|$ 
for  $k$  de 0 à sizeD - 1 do
     $\overline{D}[k] \leftarrow D[k]$ 
     $\overline{D}[\text{sizeD} + k] \leftarrow 2^{W_n+2} - D[k]$ 
end for
for  $k$  de 0 à  $2^{W_n+2} - 1$  do
     $D_{max}[k] \leftarrow 0$ 
end for
for  $k$  de 0 à sizeD - 1 do
     $D_{max}[\overline{D}[k]] \leftarrow D[k]$ 
     $D_{max}[\overline{D}[\text{taille} + k]] \leftarrow -D[k]$ 
end for
while  $i \geq 3$  do
     $j \leftarrow 2 \times \text{sizeD}$ 
     $\text{borne} \leftarrow 2^{W_n+2-i-1}$ 
    while  $j \geq 0$  do
        for  $k$  de 0 à  $\text{borne} - 1$  do
             $d \leftarrow \overline{D}[j] + 2^i \times (2k + 1) \bmod(2^{W_n+2})$ 
            if  $D_{max}[d] = 0$  then
                if  $j < \text{sizeD}$  then
                     $D_{max}[d] \leftarrow \overline{D}[j]$ 
                else  $\{j \geq \text{sizeD}\}$ 
                     $D_{max}[d] \leftarrow -\overline{D}[j - \text{taille}]$ 
                end if
            end if
        end for
         $j \leftarrow j - 1$ 
    end while
     $i \leftarrow i - 1$ 
end while
```

---

## La fonction *digit* sous forme mathématique

On peut remarquer que calculer la fonction *digit* revient à trouver une fonction vérifiant cette propriété :

**Propriété 1.** Soit  $\phi_{1_{\mathcal{D}}} : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{Z}/2^{W_n+2}\mathbb{Z}$ , la projection canonique restreint à  $\mathbb{N}$ , et  $\phi_{2_{\mathcal{D}}} : \mathbb{Z}/2^{W_n+2}\mathbb{Z} \rightarrow \overline{\mathcal{D}} \cup \{0\}$  une fonction.

On a  $\text{digit}_{\mathcal{D}} = \phi_{2_{\mathcal{D}}} \circ \phi_{1_{\mathcal{D}}} \iff \forall k, \bar{k} = \phi_1(k) = k \text{ Mod } 2^{W_n+2} \text{ et :}$

(i) Si  $k$  est pair  $\phi_{2_{\mathcal{D}}}(\bar{k}) = 0$

(ii) Si  $k$  est impair  $\phi_{2_{\mathcal{D}}}(\bar{k}) = d_i$ , avec  $d_i \in \overline{\mathcal{D}} \Rightarrow \exists j \in \llbracket 2, W_n + 2 \rrbracket$ , tel que  $k = d_i \text{ Mod } 2^j$  et  $\forall m \in \llbracket j + 1, W_n + 2 \rrbracket, \forall d'_i \in \overline{\mathcal{D}}, k \neq d'_i \text{ Mod } 2^m$ .

**Remarque 1.** La condition (ii) explique que le  $j$  que l'on trouve doit être le plus grand possible.

**Preuve 1.** On prouve la double implication pour tout  $k$  dans  $\mathbb{N}$ .

D'abord si  $k$  est pair, c'est évident car les deux fonctions valent 0 et  $\phi_{1_{\mathcal{D}}}(k)$  est "paire" pour  $k$  pair et ne peut valoir 0 si  $k$  est impair.

Maintenant si  $k$  est impair. Commençons avec l'implication  $\Leftarrow$  :

$\Leftarrow$  Soit  $\phi_{2_{\mathcal{D}}}$  vérifiant les conditions (i) and (ii).

Alors  $\exists j \in \llbracket 2, W_n + 2 \rrbracket$ , tel que  $k = d_i \text{ Mod } 2^j$  et  $\forall m \in \llbracket j + 1, W_n + 2 \rrbracket$ ,

$\forall d'_i \in \overline{\mathcal{D}}, \bar{k} \neq d'_i \text{ Mod } 2^m$ .

So  $\forall m > j, p_m(k) \notin \overline{\mathcal{D}_m}$ .

That implies  $w_{\max} \leq j$ .

Furthermore  $\bar{k} = d_i \text{ Mod } 2^j$  with  $d_i$  in  $\overline{\mathcal{D}}$ , which means  $p_j(k) \in \overline{\mathcal{D}_j}$ . Finally we have  $w_{\max} = j$ .

- Si  $d_i \in \mathcal{D}$ ,  $p_j(k) = p_j(d_i) \Rightarrow \text{digit}_{\mathcal{D}}(k) = \phi_{2_{\mathcal{D}}}(\bar{k})$ .
- Si  $-d_i \in \mathcal{D}$ ,  $p_j(k) = p_j(d_i) \Rightarrow 2^j - p_j(k) = p_j(-d_i) \Rightarrow 2^j - p_j(k) \in \mathcal{D}$ .  
And so  $\text{digit}_{\mathcal{D}}(k) = -(-d_i) = d_i = \phi_{2_{\mathcal{D}}}(\bar{k})$ .

$\Rightarrow$  On suppose que l'on a  $\text{digit}_{\mathcal{D}}(k) = \phi_{2_{\mathcal{D}}}(\bar{k}) = d_i$  ou  $-d_i$  avec  $d_i \in \mathcal{D}$ .

On a  $\text{digit}_{\mathcal{D}}(k) = d_i$  avec  $d_i \in \overline{\mathcal{D}_m}$ .

Let  $j = w_{\max}(k) = W_{\max}$ .

Par définition de  $w_{\max}(k)$ , la condition 2) est fausse  $\forall m > j$ , donc  $\nexists d'_i \in \mathcal{D}$  tel que  $p_m(k) \in \overline{\mathcal{D}_m}$ .

Ainsi  $\forall m > j, \forall d'_i \in \overline{\mathcal{D}}, k \neq d'_i \text{ Mod } 2^m$ .

De plus  $j = w_{\max} \Rightarrow w_{\max}$  satisfait la condition 2),

i.e.  $p_j(k) \in \overline{\mathcal{D}_j} \Rightarrow \exists d_i \in \mathcal{D}$  tel que  $k = d_i \text{ Mod } 2^j$ .

## Preuve de fonctionnement de $D_{\max}$

**Proposition 1.** Soit  $\phi_{1_{\mathcal{D}}} : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{Z}/2^{W_n+2}\mathbb{Z}$  la projection canonique restreint à  $\mathbb{N}$  et  $\phi_{2_{\mathcal{D}}} : \mathbb{Z}/2^{W_n+2}\mathbb{Z} \rightarrow \overline{\mathcal{D}} \cup \{0\}$  tel que  $\phi_{2_{\mathcal{D}}}(\bar{k}) = D_{\max}[\bar{k}]$ . Donc on a  $\text{digit}_{\mathcal{D}} = \phi_{2_{\mathcal{D}}} \circ \phi_{1_{\mathcal{D}}}$ .

**Preuve 2.** Par construction  $\phi_{2_{\mathcal{D}}} : \mathbb{Z}/2^{W_n+2}\mathbb{Z} \rightarrow \overline{\mathcal{D}} \cup \{0\}$  donc  $\phi_{2_{\mathcal{D}}}$  existe. Par la propriété 1, on doit prouver que  $\phi_{2_{\mathcal{D}}}$  vérifie  $\forall k$  :



(i) Si  $k$  est pair  $\phi_{2_{\mathcal{D}}}(\bar{k}) = 0$

(ii) Si  $k$  est impaire  $\phi_{2_{\mathcal{D}}}(\bar{k}) = d_i$ , avec  $d_i \in \overline{\mathcal{D}} \Rightarrow \exists j \in \llbracket 2, W_n + 2 \rrbracket$ , tel que  $k = d_i \text{ Mod } 2^j$  et  $\forall m \in \llbracket j + 1, W_n + 2 \rrbracket, \forall d'_i \in \overline{\mathcal{D}}, k \neq d'_i \text{ Mod } 2^m$ .

Maintenant regardons la preuve :

(i) La première condition est vérifiée parce que  $D_{\max}[l] = 0$  pour  $0 \leq l < 2^{W_n+2}$  (initialisation) et le tableau est complété en ajoutant des éléments impairs (les impairs de  $\mathcal{D}$  et  $d + 2p$ ,  $d$  dans  $\mathcal{D}$ ).

(ii) La deuxième condition est plus difficile à prouver.

Par construction  $\phi_{2_{\mathcal{D}}}(\bar{k}) = d_i$  avec  $d_i \in \overline{\mathcal{D}}$  signifie  $\exists j \in \llbracket 2, W_n + 2 \rrbracket$  s.t.  $\bar{k} = d_i + (2l + 1)2^j \text{ Mod } 2^{W_{\max}}$  avec  $0 \leq l < 2^{W_n+2-j-1}$ , (1)  
et  $\forall m > j, \nexists d'_i, l'$  tel que  $\bar{k} = d'_i + (2l' + 1)2^m \text{ Mod } 2^{W_n+2}$ . (1bis)

La relation (1) implique  $\exists j$  tel que  $k = \bar{k} = d_i \text{ Mod } 2^j$ .

Maintenant il faut montrer que  $\forall m \in \llbracket j + 1, W_n + 2 \rrbracket, \forall d'_i \in \overline{\mathcal{D}}, k \neq d'_i \text{ Mod } 2^m$ .

Par l'absurde on suppose qu'il existe un tel  $m > j$  et  $d'_i \in \overline{\mathcal{D}}$  tel que :

$$k = d'_i \text{ Mod } 2^m. (2)$$

By (2), on a  $k = d'_i + n \times 2^m \text{ Mod } 2^{W_n+2}$  avec  $0 \leq n < 2^{W_n+2-m}$ . (3)

Par distinction de cas, on a :

- Si  $n = 0$ , (3)  $\Rightarrow k = d'_i \text{ Mod } 2^{W_n+2}$ , contradiction avec la construction de  $D_{\max}$  (on complète d'abord le tableau avec les éléments de  $\overline{\mathcal{D}}$ ).
- Si  $n$  est pair, i.e.  $n = 2n'$ , soit  $m' = m + 1$  et  
(3)  $\Rightarrow k = d'_i + n' \times 2^{m'} \text{ Mod } 2^{W_n+2}$ . Si  $n'$  est encore pair, on réitère le procédé jusqu'à ce que  $n'$  soit pair. On réduit le problème au cas  $n$  impair.
- Si  $n$  est impair, i.e.  $n = 2l' + 1$ .  
Alors (3)  $\Rightarrow k = d'_i + (2l' + 1) \times 2^m \text{ Mod } 2^{W_n+2}$  avec  $0 \leq 2l' + 1 < 2^{W_n+2-m}$ .  
Et  $0 \leq 2l' + 1 < 2^{W_n+2-m} \Rightarrow 0 \leq l' < 2^{W_n+2-m-1}$ .  
Finalement on a  $k = d'_i + (2l' + 1) \times 2^m \text{ Mod } 2^{W_n+2}$  avec  $0 \leq l' < 2^{W_n+2-m-1}$ . Il y a contradiction avec (1bis). Impossible.

Donc  $\phi_{2_{\mathcal{D}}}$  vérifie la seconde condition and d'après la propriété, on a  $\text{digit}_{\mathcal{D}} = \phi_{2_{\mathcal{D}}} \circ \phi_{1_{\mathcal{D}}}$ .

**Corollaire 1.** On peut utiliser l'algorithme de construction de  $D_{\max}$  pour calculer la fonction  $\text{digit}$ .

## 2.2.4 Test et Performance

Nous avons effectuer des tests de performance afin de déterminer l'influence de cette méthode de randomisation de la représentation sur la vitesse d'exponentiation.

TABLE 2.1 : Temps d'exécution (10000 tests)

#D	$ k $	$RDR$	$wNAF$	perte (en %)
4	256	373	244	54
4	4096	11950	10820	10
8	256	342	224	52
16	4096	12101	10585	14
32	256	526	214	146
64	256	1108	220	504
64	4096	12481	10538	18

### Comparaison avec $wNAF$

In Table 6.2, the ... [1].

On remarque que pour plus la taille de  $k$  augmente, plus la perte relative diminue. Cependant pour une taille plus petite de  $k$  petite (256 bits), la perte est significative ( $> 50\%$ ), et plus particulièrement lorsqu'on augmente la taille de  $\mathcal{D}$ .

## Etat de l'art de la double exponentiation

La partie précédente a permis de comprendre la *RDR* (Random Digit Representation) proposée par Nicolas Méloni. Cette partie s'intéresse à la généralisation de la *RDR* pour la multi-exponentiation et plus particulièrement pour la double exponentiation, c'est-à-dire au calcul de  $g^a \times h^b$ , où  $g$  et  $h$  sont des éléments de  $\mathcal{G}$  (un groupe), et  $a$  et  $b$  des entiers naturels.

Le procédé de multi-exponentiation est très utilisé dans les protocoles de signatures, que ce soit à base de courbes elliptiques, ou dans d'autres cas comme dans la signature El-Gamal.

Pour se faire, il est important de rappeler l'état de l'art de la double exponentiation.

La première partie explique l'approche de Shamir dans la double exponentiation.

La seconde partie donne la méthode qui a servi de base pour construire la *DoubleRDR* (la *RDR* étendue à la double exponentiation).

### 3.1 L'approche de Shamir

Dans un premier temps, je donne la méthode naïve de la double exponentiation afin de constater comment Shamir a réussi à l'optimiser dans les parties suivantes.

#### 3.1.1 La méthode naïve

La méthode la plus simple pour calculer  $g^a \times h^b$  est de calculer  $g^a$  et  $h^b$  séparément, puis de les multiplier entre eux.

Appliquer ce processus revient à effectuer deux exponentiations et une multiplication, ce qui fait en moyenne  $2l$  "square" et  $l$  multiplications, où  $l$  est la taille de  $a$  et de  $b$  (approximativement).

#### 3.1.2 Le "square" en simultané

Le premier constat de Shamir fut qu'il était possible de faire un "square" pour les deux exposants à la fois.

Pour illustrer cette méthode, je prend l'exemple suivant :

Soit  $a = 37$  et  $b = 20$ , ie on cherche à calculer  $g^{37}h^{20}$ .

$$\begin{array}{rcl}
37 = & (1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1) \\
20 = & (0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0) \\
\Box & 1 & g^2 & g^4 h^2 & g^8 h^4 & g^{18} h^{10} & g^{36} h^{20} \\
\times g & g & & & g^9 h^4 & & g^{37} h^{20} \\
\times h & & g^2 h & & g^9 h^5 & & 
\end{array}$$

Le symbole  $\Box$  correspond à l'opération "square" qu'on effectue à chaque bit.

Les autres symboles  $\times g$  et  $\times h$  correspondent tout simplement à la multiplication par  $g$  et  $h$  respectivement.

On s'aperçoit donc que chaque coefficient non nul dans la représentation de  $g$  et dans celle de  $h$ , donne lieu à une multiplication, cependant cette technique permet de diviser par 2 le nombre de "square" (seulement 5 au lieu de 10 dans notre cas).

Ainsi cette technique donne en moyenne  $l$  "square" et  $l$  multiplications et est appelée *Simple Shamir Method*.

### 3.1.3 Le précalcul

Le deuxième constat de Shamir concerna les mutliplications, et particulièrement la quatrième colonne du tableau précédent. Il s'aperçut qu'il était possible d'économiser une multiplication à chaque fois que le coefficient de chaque exposant était non nul simultanément (comme au bit 4 pour 37 et 20).

Le moyen simple d'éviter ces deux multiplications est de précalculer le produit  $g \times h$ , et ainsi de multiplier directement par  $g \times h$  pour économiser une opération à chaque apparition de 1 sur la même colonne.

Avec le même exemple que dans la partie précédente, on a :

$$\begin{array}{rcl}
37 = & (1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1) \\
20 = & (0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0) \\
\Box & 1 & g^2 & g^4 h^2 & g^8 h^4 & g^{18} h^{10} & g^{36} h^{20} \\
\times g & g & & & & & g^{37} h^{20} \\
\times h & & g^2 h & & & & \\
\times gh & & & & g^9 h^5 & & 
\end{array}$$

Ainsi cette technique donne en moyenne  $l$  "square" et  $\frac{3l}{4}$  multiplications et est appelée *Fast Shamir Method*.

## 3.2 L'approche de Solinas et la JSF

L'approche de Shamir a l'avantage de fonctionner pour tous les groupes, et en particulier dans le cas des courbes elliptiques, ainsi il est possible d'utiliser les astuces des parties précédentes dans ce cas.

C'est avec cette idée que Solinas a pensé une méthode pour recoder les deux exposants dans la double exponentiation afin d'en accélérer l'exécution.

### 3.2.1 Basé sur un *NAF*

Dans le cas des courbes elliptiques, où le calcul de  $-P$  est négligeable comparé à l'addition de points (analogie entre multiplication scalaire pour les courbes elliptiques et exponentiation modulaire), on peut utiliser une représentation signée ("signed binary expansion"), c'est-à-dire utiliser 0, 1 ET  $-1$ .

Cependant, étant donné qu'il existe une infinité de représentation signée, on utilise la représentation optimale (au vu du nombre de 0) de l'exposant, appelée aussi représentation *NAF* (vu dans la première partie) qui vérifie certaines propriétés.

Solinas est allé encore plus loin en constatant qu'il était encore plus optimal de choisir entre la représentation classique et la représentation *NAF* pour chacun des exposants afin que les coefficients non nuls de chaque recodage se situent sur les mêmes bits (à la même colonne dans la représentation).

Par exemple, avec les exposants 11 et 20, le calcul de  $11P + 20Q$  donne :

$$\begin{array}{rcccccc}
 11 = & (1 & 0 & -1 & 0 & -1) \\
 20 = & (1 & 0 & 1 & 0 & 0) \\
 \times 2 & \mathcal{O} & 2P + 2Q & 4P + 4Q & 6P + 10Q & 12P + 20Q \\
 \pm P & P & & 3P + 4Q & & 11P + 20Q \\
 \pm Q & P + Q & & 3P + 5Q & & 
 \end{array}$$

Pour le premier exposant, j'ai opté pour la représentation *NAF* alors que pour le deuxième exposant, j'ai choisi la représentation classique. Le résultat est que le nombre de zéros sur la même colonne permet d'économiser des multiplications.

Cette représentation est appelée "Joint Signed Binary Expansion", elle est adaptée à la "Simple Shamir Method" dans l'exemple. Il existe également une adaptation de ce raisonnement avec la "Fast Shamir Method" mais elle n'est pas triviale.

Quoiqu'il en soit, la "Joint Signed Binary Expansion" nécessite en moyenne  $l$  doublages (équivalent du "square") et  $\frac{2l}{3}$  additions avec l'adaptation simple, et  $l$  doublages et  $\frac{5l}{9}$  additions avec l'adaptation rapide de Shamir.

C'est avec cette approche que Solinas a trouvé une autre méthode de recodage.

### 3.2.2 La Joint Spar Form

Dans cette partie, j'expliquerai la méthode de Solinas pour recodant les deux exposants dans la double exponentiation.

Dans un premier temps, j'explicite la notion de poids "joint" de Hamming, puis dans un exemple je montre l'avantage de la *JSF* sur la représentation *NAF*. Ensuite je donne un exemple concret dont je me servirai dans les prochaines parties, puis finalement je donne les résultats qu'a obtenu Solinas avec cette méthode.

#### Joint Hamming Weight

Le Poids de Hamming Joint est le nombre de colonnes non nuls dans la représentation de deux nombres. Une colonne non nul est un bit pour lequel l'un des deux (ou les deux !) exposant(s) a un coefficient non nul. Par exemple, dans le cas de la partie précédente, on a :

$$\begin{array}{rccccc}
 11 = & (1 & 0 & -1 & 0 & -1) \\
 20 = & (1 & 0 & 1 & 0 & 0)
 \end{array}$$

Le poids de Hamming Joint de cette représentation est 3 car il y a 3 colonnes non nuls (et 2 colonnes  $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ ).

Si on applique la Fast Shamir Method à cette représentation, le nombre d'addition est exactement poids de Hamming Joint de la représentation.

### Comparaison avec *NAF*

Avant de comprendre la construction de la représentation *JSF*, je montre dans un exemple comparatif l'efficacité de cette dernière.

Alors que *NAF* a pour but de minimiser le poids de Hamming de chacun des exposants, la *JSF* a pour but de minimiser le Poids de Hamming Joint.

Dans l'exemple ci-dessous, on remarque qu'avec la représentation *NAF* :

$$\begin{aligned} 53 &= (0 \ 1 \ 0 \ -1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1) \\ 102 &= (1 \ 0 \ -1 \ 0 \ 1 \ 0 \ -1 \ 0) \end{aligned}$$

Le poids de Hamming Joint est 8 (il n'y a aucun  $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ ).

Les mêmes exposants avec la représentation *JSF* :

$$\begin{aligned} 53 &= (0 \ 1 \ 0 \ 0 \ -1 \ 0 \ -1 \ -1) \\ 102 &= (1 \ 0 \ 0 \ -1 \ -1 \ 0 \ -1 \ 0) \end{aligned}$$

Le poids de Hamming Joint est seulement 6 (il y a 2  $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ ).

La *JSF* dans ce cas permet d'économiser deux additions, cependant il faut précalculer  $P+Q$  et  $P-Q$ .

### Un exemple simple

Voici un exemple simple de la Fast Shamir Method appliquée à la *JSF*, avec 53 et 102 comme exposants :

$$\begin{array}{llllllll} 53 = & (0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & -1) \\ 102 = & (1 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & -1 & 0) \\ \times 2 & \mathcal{O} & 2Q & 2P+4Q & 4P+8Q & 8P+14Q & 14P+26Q & 28P+52Q & 54P+102Q \\ \pm P & & P+2Q & & & & & & 53P+102Q \\ \pm Q & Q & & & 4P+7Q & & & & \\ \pm(P+Q) & & & & & 7P+13Q & & 27P+51Q & \\ \pm(P-Q) & & & & & & & & \end{array}$$

Cette méthode nécessite en moyenne  $l$  doublages et  $\frac{l}{2}$  additions.

## Approche du problème

La partie précédente a rappelé l'état de l'art de la double exponentiation, cette partie s'intéresse à la problématique suivante : peut-on étendre la *RDR* de Nicolas Méloni à la double exponentiation ?

L'objectif principal de la *RDR* est la protection de l'algorithme d'exponentiation contre les attaques par canal auxiliaire. Ainsi, la *DoubleRDR* (*RDR* étendue à la double exponentiation) doit pouvoir utiliser des coefficients quelconques (impairs). Il faut également que les résultats ne dépendent pas des coefficients choisis sous peine de voir la méthode vulnérable à une attaque "side channel".

L'objectif secondaire de la *DoubleRDR* est de rendre l'exponentiation modulaire la plus efficace possible.

Dans une première section, on définit la *DoubleRDR* et les contraintes associées.

La deuxième section détaille la méthode générale de la *DoubleRDR*.

Puis la dernière section donne un exemple de *DoubleRDR* de deux exposants afin de mieux comprendre la méthode.

### 4.1 La représentation d'un couple d'exposants

Dans cette partie, on fixe un couple d'exposants  $(k_1, k_2) = (53, 102)$  et un ensemble  $\mathcal{D} = \{1, 3, 23, 27\}$ , puis on détermine la représentation idéale, au sens des objectifs fixés, de ce couple.

Solinas a adapté la méthode *NAF* à la double exponentiation, ainsi il semble possible d'adapter la *RDR* à la double exponentiation, en utilisant le même procédé.

A l'aide d'un exemple simple, cette partie définit la *DoubleRDR* au sens des objectifs fixés et des avantages de cette représentation.

#### 4.1.1 Une solution simple à l'objectif 1

Le premier objectif de la *DoubleRDR* est le recodage des deux exposants à l'aide de coefficients aléatoire (de cette façon, la *DoubleRDR* rend l'algorithme d'exponentiation résistant à une attaque "side-channel").

Une première approche triviale consiste à utiliser la *RDR* sur chacun des exposants, de cette manière la représentation obtenue utilise les coefficients de  $\mathcal{D}$  et remplit l'objectif 1.

En suivant la *RDR*, on obtient :

$$\begin{array}{rcl} 53 & = & (1 \ 0 \ 0 \ -3 \ 0 \ 0 \ 0 \ -27) \\ 102 & = & (0 \ 0 \ 3 \ 0 \ 0 \ 0 \ 3 \ 0) \end{array}$$

Le poids de Hamming Joint de cette représentation est 5 car il y a trois  $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$  sur huit bits.

Il s'agit de déterminer si cette représentation est la meilleure représentation possible au vu de l'objectif 2. Pour se faire, d'après l'approche de Shamir (Fast Shamir Method), la représentation la plus efficace de  $(k_1, k_2)$  est celle ayant un poids de Hamming Joint minimal, c'est-à-dire un nombre de  $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$  maximal.

### 4.1.2 La *JSF*, solution à l'objectif 2

Afin de déterminer la représentation *DoubleRDR*, une seconde approche consiste à utiliser la méthode *JSF*, méthode la plus efficace pour l'objectif 2, puis à l'adapter avec des coefficients de  $\mathcal{D}$ .

Par exemple, la *JSF* de  $(k_1, k_2)$  est :

$$\begin{array}{rcl} 53 & = & (0 \ 1 \ 0 \ 0 \ -1 \ 0 \ -1 \ -1) \\ 102 & = & (1 \ 0 \ 0 \ -1 \ -1 \ 0 \ -1 \ 0) \end{array}$$

Le poids de Hamming Joint de la représentation est 6, cependant l'ensemble  $\mathcal{D}$  est réduit à  $\{1\}$ . Il est évident que cette représentation présente des avantages en terme d'efficacité, et donc des avantages au vu de l'objectif 2, cependant elle ne remplit pas la condition de l'objectif 1 car elle n'utilise que les coefficients 0, 1 et  $-1$ .

Ce qui est important dans la méthode *JSF* est de faire correspondre les coefficients non nuls afin de créer des doubles zéros, comme on peut le voir dans l'exemple ci-dessous :

Représentation *NAF* de 53 et de 102 :

$$\begin{array}{rcl} 53 & = & (0 \ 1 \ 0 \ -1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1) \\ 102 & = & (1 \ 0 \ -1 \ 0 \ 1 \ 0 \ -1 \ 0) \end{array}$$

Représentation *JSF* de 53 et de 102 :

$$\begin{array}{rcl} 53 & = & (0 \ 1 \ 0 \ 0 \ -1 \ 0 \ -1 \ -1) \\ 102 & = & (1 \ 0 \ 0 \ -1 \ -1 \ 0 \ -1 \ 0) \end{array}$$

Les coefficients non nuls de la première représentation sont tous décalés (il n'y a aucun 0 sur la même colonne, et donc sur le même bit), alors que la deuxième représentation offre l'avantage d'avoir deux 0 sur le même bit (c'est-à-dire deux  $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ ) et donc un poids de Hamming de 6 au lieu de 8.

### 4.1.3 La représentation *DoubleRDR*

Voici deux autres représentations possible de  $(53, 102)$  basées sur les deux premiers recodages *RDR* et *JSF* :



$$\begin{array}{rcl} 53 & = & (1 \ 0 \ -1 \ 0 \ 0 \ 0 \ -23 \ 3) \\ 102 & = & (1 \ 0 \ -1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 3 \ 0) \end{array}$$

Le poids de Hamming Joint de cette représentation est de 4.

Et :

$$\begin{array}{rcl} 53 & = & (0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ -1 \ 23) \\ 102 & = & (0 \ 0 \ 3 \ 0 \ 0 \ 0 \ 3 \ 0) \end{array}$$

Le poids de Hamming Joint de cette représentation est de 3.

Voici les premiers constats que l'on peut faire en observant ces résultats :

- La *RDR* de chacun des exposants  $k_1$  et  $k_2$  n'est pas la meilleure représentation de  $(k_1, k_2)$  au sens des objectifs donnés.
- Une représentation où les coefficients non nuls de chacun des exposants sont à la même place (1 et 3, puis  $-1$  et 3 sur la même colonne) est plus efficace.

De ces constats, on peut définir la *DoubleRDR* selon les deux objectifs suivants :

Objectif 1 : On choisit  $d_0$  et  $d'_0$  les coefficients dans la *DoubleRDR* de  $k_1$  et  $k_2$  respectivement, tels que le prochain coefficient *non nul* de chaque exposant "coïncident", c'est-à-dire tels qu'il y ait le même nombre de 0 consécutifs après  $d_0$  et  $d'_0$  dans la représentation.

Objectif 2 : La représentation doit contenir un maximum de  $\binom{0}{0}$  consécutifs.

Pour résumer, lorsqu'on choisit un coefficient pour  $k_1$  et/ou pour  $k_2$ , il faut d'abord que les prochains coefficients *non nuls* de chaque exposant soient sur le même bit, puis si c'est possible qu'il y ait le maximum de 0 consécutifs dans la représentation.

**Remarque 2.** Comme  $1 \in \mathcal{D}$ , si  $k_1$  et  $k_2$  impairs, il est toujours possible de choisir  $d_0$  et  $d'_0$  tels que  $k_1$  et  $k_2$  "coïncident".

Par exemple, si  $k_1 = 1 \pmod{4}$  et  $k_2 = 3 \pmod{4}$ , alors il suffit de choisir  $d_0 = -1$  et  $d'_0 = 1$ . Dans ce cas, on aura  $k_1 - d_0 = k_2 - d'_0 = 2 \pmod{4}$ , et donc  $\frac{k_1 - d_0}{2}$  et  $\frac{k_2 - d'_0}{2}$  tous deux impairs.

## 4.2 La méthode *DoubleRDR*

Dans la partie précédente, la représentation *DoubleRDR* d'un couple d'exposant a été définie. Dans cette partie, une méthode pour calculer la *DoubleRDR* de  $k_1$  et  $k_2$  est détaillée.

### 4.2.1 Le début de la *DoubleRDR*

Avant de détailler le recodage de la *DoubleRDR*, il est nécessaire de rappeler certaines conditions :

- Pour recoder un exposant, il faut utiliser les propriétés arithmétiques du nombre, ou éventuellement sa représentation binaire (on ne peut pas utiliser la représentation *wNAF*, *RDR* ou encore *JSF*).

- Il faut fixer une taille de fenêtre maximale en fonction des éléments de  $\mathcal{D}$ . Etant donné que l'ensemble  $\mathcal{D}$  est borné, le choix d'un coefficient dépend uniquement des premiers bits suivants (équivalent de  $W_n + 2$  dans l'algorithme de *RDR*)
- Il est plus pratique et plus efficace de commencer la méthode de recodage par le bit de poids faible plutôt que par le bit de poids fort.

Pour la suite, les bits de poids faibles sont à gauche (et non à droite comme précédemment). Ainsi, le recodage s'effectue de la gauche (bit de poids faible) vers la droite (bit de poids fort). L'exemple de 53 et 102 donne :

$$\begin{array}{rcl} 53 & = & (1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0) \\ 102 & = & (0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1) \end{array}$$

Il est nécessaire de fixer une taille de fenêtre en fonction des coefficients de  $\mathcal{D}$ , on calcule (comme dans la *RDR*)  $W_n = \lfloor \log_2(\max_i(d_i)) \rfloor$ , et on définit  $W_{max} = W_n + 2$ .

On peut définir également  $\mathcal{D} = \mathcal{D} \cup -\mathcal{D}$ , qu'on utilise dans la *DoubleRDR*.

Ainsi pour  $\mathcal{D} = \{1, 3, 23, 27\}$ , on a  $\mathcal{D} = \{1, 3, 23, 27, -1, -3, -23, -27\}$ , et  $W_{max} = \lfloor \log_2(27) \rfloor + 2 = 6$ .

## 4.2.2 Le choix des coefficients

Cette partie explique comment choisir les coefficients de la *DoubleRDR*.

### Bits de poids faibles

Tout d'abord, il faut déterminer le bit de poids faible  $B_{f,1}$  et  $B_{f,2}$  des exposants  $k_1$  et  $k_2$  respectivement.

Pour  $k_1 = 53$  et  $k_2 = 102$ , on a  $B_{f,1} = 0$  et  $B_{f,2} = 1$ .

Ainsi, les  $B_{f,1}$  premiers coefficients de la *DoubleRDR* de  $k_1$  sont nuls, de même pour  $k_2$ .

Dans notre exemple on a donc :

$$\begin{array}{rcl} 53 & = & (? \ \dots \ \dots) \\ 102 & = & (0 \ ? \ \dots) \end{array}$$

Et pour le cas général, en supposant  $B_{f,1} > B_{f,2}$ , on a :

$$\begin{array}{rcl} k_1 & = & ( \underbrace{0 \dots 0}_{0 \dots B_{f,2}-1} \ 0 \ \underbrace{0 \dots 0}_{B_{f,1}-B_{f,2}-1} \ ? \ \dots ) \\ k_2 & = & ( \underbrace{0 \dots 0}_{0 \dots B_{f,2}-1} \ ? \ \underbrace{0 \dots 0}_{B_{f,1}-B_{f,2}-1} \ \dots \ \dots ) \end{array}$$

Il faut ensuite diviser par  $2^{B_{f,i}}$  l'exposant  $k_i$  (afin d'avancer dans la représentation).

### Disjonction de cas

Ensuite, il faut distinguer deux cas principaux :

1<sup>er</sup> cas : Si  $B_{f,1} = B_{f,2}$ , ce cas est détaillé dans la prochaine partie.

2<sup>ème</sup> cas : Si  $B_{f,1} \neq B_{f,2}$ , alors on calcule  $\omega = |B_{f,1} - B_{f,2}|$ .

Dans cette partie, on explique le deuxième cas.

Prenons par exemple le cas où  $B_{f,1} > B_{f,2}$  (dans le cas contraire, il suffit d'intervertir les rôles de  $k_1$  et  $k_2$ ), il s'agit de déterminer un coefficient  $d_0$  pour  $k_2$  tel que le prochain coefficient non nul de  $k_2$  soit sur le bit  $B_{f,1}$ .

Ce qui donnera ceci dans la représentation :

$$\begin{aligned} k_1 &= ( \underbrace{0 \dots 0}_{0 \dots B_{f,2}-1} \quad 0 \quad \underbrace{0 \dots 0}_{B_{f,1}-B_{f,2}-1} \quad ? \quad \dots ) \\ k_2 &= ( \underbrace{0 \dots 0}_{0 \dots B_{f,2}-1} \quad d_0 \quad \underbrace{0 \dots 0}_{B_{f,1}-B_{f,2}-1} \quad ? \quad \dots ) \end{aligned}$$

Afin de choisir le coefficient  $d_0$  de  $k_2$ , il faut trouver  $d_0 \in \overline{\mathcal{D}}$  tel que :

$$\begin{aligned} 2^\omega &| (k_2 - d_0) \mod (2^{W_{max}}) \\ 2^{\omega+1} &\nmid (k_2 - d_0) \mod (2^{W_{max}}) \end{aligned}$$

Il peut arriver qu'aucun élément de  $\overline{\mathcal{D}}$  vérifie ces conditions, dans ce cas on pose  $\omega' = \omega - 1$ , il faut trouver  $d_0 \in \overline{\mathcal{D}}$  tel que :

$$\begin{aligned} 2^{\omega'} &| (k_2 - d_0) \mod (2^{W_{max}}) \\ 2^{\omega'+1} &\nmid (k_2 - d_0) \mod (2^{W_{max}}) \end{aligned}$$

On répète le processus jusqu'à trouver une solution vérifiant les conditions.

Puis on calcule  $\frac{k_2 - d_0}{2^{\omega'}}$ , afin d'avancer dans la représentation.

**Exemple 4.** Pour  $k_1 = 53$  et  $k_2 = 102$ , on a  $0 = B_{f,1} < B_{f,2} = 1$ , donc  $\omega = 1 - 0 = 1$ .

Trouvons un coefficient  $d_0 \in \overline{\mathcal{D}}$  tel que :

$$\begin{aligned} 2 &| (53 - d_0) \mod 2^6 \\ 4 &\nmid (53 - d_0) \mod 2^6. \end{aligned}$$

Les valeurs 3, 23, 27 et  $-1$  sont solutions, on pose  $d_0 = 3$  (choix arbitraire).

On obtient ainsi :

$$\begin{aligned} 53 &= (\textcolor{blue}{3} \quad ? \quad \dots) \\ 102 &= (\textcolor{blue}{0} \quad ? \quad \dots) \end{aligned}$$

Puis on calcule  $\frac{53-3}{2} = 25$ .

## Synchronisation des coefficients

Cette partie a pour but d'expliquer comment choisir les coefficients  $d_0$  et  $d'_0$  de  $k_1$  et  $k_2$  respectivement lorsqu'on est dans le premier cas (voir partie précédente).

Dans le cas où  $B_{f,1} = B_{f,2}$ , on choisit les coefficients  $d_0$  et  $d'_0$  de  $k_1$  et  $k_2$  simultanément.

Il faut choisir  $d_0$  et  $d'_0$  tels qu'il y ait un *même* nombre *maximum*, noté  $\omega_{max} - 1$ , de zéros consécutifs dans les représentations de  $k_1$  et  $k_2$ , ce qui donnera ceci dans la représentation *DoubleRDR* :

$$\begin{aligned} k_1 &= ( \underbrace{0 \dots 0}_{0 \dots B_{f,1}-1} \quad d_0 \quad \underbrace{0 \dots 0}_{\omega_{max}-1} \quad ? \quad \dots ) \\ k_2 &= ( \underbrace{0 \dots 0}_{0 \dots B_{f,2}-1} \quad d'_0 \quad \underbrace{0 \dots 0}_{\omega_{max}-1} \quad ? \quad \dots ) \end{aligned}$$

Afin de choisir  $d_0$  et  $d'_0$ , il faut déterminer  $\omega_{max} \leq W_{max}$  tel que :

$$\begin{aligned} \exists d_0 \in \overline{\mathcal{D}} \text{ tel que : } 2^{\omega_{\max}} \mid (k_1 - d_0) \bmod 2^{W_{\max}} \text{ et } 2^{\omega_{\max}+1} \nmid (k_1 - d_0) \bmod 2^{W_{\max}}, \\ \exists d'_0 \in \overline{\mathcal{D}} \text{ tel que : } 2^{\omega_{\max}} \mid (k_2 - d'_0) \bmod 2^{W_{\max}} \text{ et } 2^{\omega_{\max}+1} \nmid (k_2 - d'_0) \bmod 2^{W_{\max}}. \end{aligned}$$

On prend  $d_0$  et  $d'_0$  comme coefficients de la *DoubleRDR* de  $(k_1, k_2)$ , puis on calcule  $\frac{k_1 - d_0}{2^{\omega_{\max}}}$  et  $\frac{k_2 - d'_0}{2^{\omega_{\max}}}$ , afin d'avancer dans la représentation.

**Exemple 5.** Pour  $k_1 = 25$  et  $k_2 = 51$  (la suite de l'exemple précédent), on a  $B_{f,1} = B_{f,2} = 0$ . Pour  $\omega_{\max} = 6$ , il n'existe pas de coefficient  $d_0$  vérifiant les conditions pour  $k_1$ . De même pour  $\omega_{\max} = 5$ . Prenons  $\omega_{\max} = 4$ , on pose  $d_0 = -23$  et  $d'_0 = 3$ , et on a :

$$\begin{aligned} (k_1 - d_0) \bmod 2^6 &= 48 \text{ divisible par } 2^4 = 16, \text{ et non divisible par } 32, \\ (k_2 - d'_0) \bmod 2^6 &= 48 \text{ divisible par } 2^4 = 16, \text{ et non divisible par } 32. \end{aligned}$$

Puis on calcule  $\frac{48}{16} = 3$ .

Ainsi, on choisit  $-23$  et  $3$  comme coefficient de  $k_1$  et  $k_2$  respectivement, et on ajoute 3 zéros, ce qui donne dans la représentation :

$$\begin{array}{rcl} 53 & = & (\textcolor{red}{3} \quad \textcolor{blue}{-23} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad ? \quad \dots) \\ 102 & = & (\textcolor{red}{0} \quad \textcolor{blue}{3} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad ? \quad \dots) \end{array}$$

Les derniers coefficients sont 3 pour  $k_1$  et  $k_2$  car  $\frac{48}{16} = 3$ . Ainsi la *DoubleRDR* de  $(k_1, k_2)$  est :

$$\begin{array}{rcl} 53 & = & (3 \quad -23 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \textcolor{blue}{3}) \\ 102 & = & (0 \quad 3 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \textcolor{blue}{3}) \end{array}$$

### 4.2.3 Fin de la *DoubleRDR*

Lorsqu'on doit recoder les derniers bits (de poids forts) des exposants, on applique la *RDR* à chacun des exposants jusqu'à la fin du recodage, en vérifiant la condition que les coefficients choisis sont inférieurs aux exposants.

**Exemple 6.** Pour  $k_1 = 7$  et  $k_2 = 13$ , on regarde chaque exposant indépendamment. La *RDR* de  $k_1$  donne :

$$7 = (-1 \quad 0 \quad 0 \quad 1)$$

Celle de  $k_2$  donne :

$$13 = (-3 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1)$$

La *DoubleRDR* de  $(k_1, k_2)$  donne :

$$\begin{array}{rcl} 7 & = & (-1 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0) \\ 13 & = & (-3 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1) \end{array}$$

## 4.3 Exemple et Contraintes

### 4.3.1 Exemple

Prenons un exemple simple afin de comprendre les tenants et les aboutissants de cette méthode.

J'ai choisi  $k_1 = 869027$  et  $k_2 = 706440$ , et  $\mathcal{D} = \{1, 3, 23, 27\}$ .

On a donc  $W_{max} = 6$  et  $\overline{\mathcal{D}} = \{1, 3, 23, 27, -1, -3, -23, -27\}$ .

La représentation binaire du couple d'exposant  $(k_1, k_2)$  est :

$$\begin{aligned} 869027 &= (1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1) \\ 706440 &= (0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1) \end{aligned}$$

Nombre de  $\binom{0}{0}$  : 6.

En appliquant la *RDR* sur chacun des nombres, on obtient :

$$\begin{aligned} 869027 &= (3 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -27 \ 0 \ 0 \ 0 \ 3 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -27 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1) \\ 706440 &= (0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ -1 \ 0 \ 0 \ 0 \ -23 \ 0 \ 0 \ 0 \ 23 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0) \end{aligned}$$

Nombre de  $\binom{0}{0}$  : 11.

On applique la méthode *DoubleRDR* sur ces deux exposants, premièrement il s'agit d'observer les bits faibles de chacun des exposants.

On a donc  $B_{f,1} = 0$  et  $B_{f,2} = 3$ , et donc  $B_{f,1} < B_{f,2}$ .

Ensuite, comme  $\omega = B_{f,1} - B_{f,2} = 3$ , il s'agit de trouver le coefficient  $d_0$  de  $\overline{\mathcal{D}}$  tel que :

$$\begin{aligned} 2^3 &\mid (k_1 - d_0) \mod 64 \\ 2^4 &\nmid (k_1 - d_0) \mod 64 \end{aligned}$$

Il y a une méthode rapide et efficace pour déterminer rapidement le coefficient  $d_0$ , il suffit de calculer  $k_1 - \overline{\mathcal{D}} = \{(k_1 - d) \mod 64, d \in \overline{\mathcal{D}}\}$ , et de choisir un nombre divisible par 8 et non divisible par 16 dans cet ensemble.

Dans ce cas, on a  $k_1 = 35 \mod 64$ , et donc on a :

$$k_1 - \overline{\mathcal{D}} = \{34, 32, 12, 8, 36, 38, 58, 62\}.$$

On remarque que 8 est divisible par 8 et non divisible par 16, et donc  $d_0 = 27$  convient ( $8 = 35 - 27$ ).

Donc on a :

$$\begin{aligned} 869027 &= (27 \ 0 \ 0 \ \dots) \\ 706440 &= (0 \ 0 \ 0 \ \dots) \end{aligned}$$

Et on effectue :

$$\begin{aligned} \frac{869027-27}{8} &= 108625 \\ \frac{706440}{8} &= 88305 \end{aligned}$$

Puis on note les bits faibles de chacun des restes,  $B_{f,1} = B_{f,2} = 0$ .

Il y a également une méthode rapide et efficace pour calculer les coefficients  $d_0$  et  $d'_0$ , on calcule  $k_1 - \overline{\mathcal{D}}$  et  $k_2 - \overline{\mathcal{D}}$ , puis on cherche  $\omega_{max}$  tel que dans chaque ensemble  $k_i - \overline{\mathcal{D}}$ , il y ait un nombre divisible par  $2^{\omega_{max}}$  et non divisible par  $2^{\omega_{max}+1}$ .

Ici  $k_1 = 17 \bmod 64$  et  $k_2 = 49 \bmod 64$ .  
Ainsi  $k_1 - \overline{\mathcal{D}} = \{16, 14, 58, 54, 18, 20, 40, 44\}$ .  
Et  $k_2 - \overline{\mathcal{D}} = \{48, 46, 26, 22, 50, 52, 8, 12\}$ .

La plus grande puissance de 2 qui divise un des éléments dans chacun des ensembles est 16 car il y a 16 dans le premier ensemble et 48 dans le second. Or 32 ne divise aucun de ces deux nombres. Donc  $\omega_{max} = 4$ .

Ainsi pour  $d_0 = 1$  pour  $k_1$  et  $d'_0 = 1$  pour  $k_2$ , la *DoubleRDR* de  $(k_1, k_2)$  donne :

$$\begin{array}{rcl} 869027 & = & (27 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ \dots \\ 706440 & = & (0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ \dots \end{array}$$

Et on effectue :

$$\begin{array}{rcl} \frac{108625-1}{16} & = & 6789 \\ \frac{88305-1}{16} & = & 5519 \end{array}$$

On continue la méthode, on est dans le même cas que précédemment ( $B_{f,1} = B_{f,2} = 0$ ).

Ainsi on réitère le processus :

Ici  $k_1 = 5 \bmod 64$  et  $k_2 = 15 \bmod 64$ .

Ainsi  $k_1 - \overline{\mathcal{D}} = \{4, 2, 46, 42, 6, 8, 28, 32\}$ .

Et  $k_2 - \overline{\mathcal{D}} = \{14, 12, 56, 52, 16, 18, 38, 42\}$ .

Cette fois-ci, on remarque que  $2^5 = 32$  divise un élément de  $k_1 - \overline{\mathcal{D}}$  (pour  $d_0 = -27$ ,  $k_1 - d_0 = 32$ ) mais aucun élément de  $k_2 - \overline{\mathcal{D}}$ , donc  $\omega_{max} < 5$ .

Puis 16 divise un élément de  $k_2 - \overline{\mathcal{D}}$ , et le seul élément de  $k_1 - \overline{\mathcal{D}}$  divisible par 16 est aussi divisible par 32, donc  $\omega_{max} < 4$ .

Donc on a 8 la plus grande puissance de 2 divisant à la fois un élément de  $k_1 - \overline{\mathcal{D}}$  et un de  $k_2 - \overline{\mathcal{D}}$ , et telle que 16 ne divise pas ces éléments, donc  $\omega_{max} = 3$ .

On prend  $d_0 = -3$  pour  $k_1$  et  $d'_0 = 23$  pour  $k_2$ .

Donc on a :

$$\begin{array}{rcl} 869027 & = & (27 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ -3 \ 0 \ 0 \ \dots \\ 706440 & = & (0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 23 \ 0 \ 0 \ \dots \end{array}$$

Et on effectue :

$$\begin{array}{rcl} \frac{6789+3}{8} & = & 849 \\ \frac{5519-23}{8} & = & 687 \end{array}$$

On obtient  $k_1$  et  $k_2$  impairs, comme précédemment. Ainsi on réitère le processus :

Ici  $k_1 = 17[64]$  et  $k_2 = 47[64]$ .

Ainsi  $k_1 - \overline{\mathcal{D}} = \{16, 14, 58, 54, 18, 20, 40, 44\}$ .

Et  $k_2 - \overline{\mathcal{D}} = \{46, 44, 24, 20, 48, 50, 6, 10\}$ .

Ainsi, on a  $\omega_{max} = 4$  en prenant  $d_0 = 1$  pour  $k_1$  et  $d'_0 = -1$  pour  $k_2$ .

Donc on a :

$$\begin{array}{rcl} 869027 & = & (27 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ -3 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ \dots \\ 706440 & = & (0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 23 \ 0 \ 0 \ -1 \ 0 \ 0 \ 0 \ \dots \end{array}$$

Et on effectue :

$$\begin{array}{rcl} \frac{849-1}{16} & = & 53 \\ \frac{687+1}{16} & = & 43 \end{array}$$

Les deux exposants sont inférieurs à 64, il reste à finir le recodage en prenant la *RDR* de chaque reste d'exposants (ici 53 et 43).

On détermine la *RDR* de chaque exposant :

$$\begin{aligned} 53 &= (-27 \ 0 \ 0 \ 0 \ -3 \ 0 \ 0 \ 1) \\ 43 &= (27 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0) \end{aligned}$$

La *DoubleRDR* de  $(k_1, k_2)$  est :

$$\begin{aligned} 869027 &= (27 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ -3 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ -27 \ 0 \ 0 \ 0 \ -3 \ 0 \ 0 \ 1) \\ 706440 &= (0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 23 \ 0 \ 0 \ -1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 27 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0) \end{aligned}$$

Nombre de  $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$  : 15.

**Remarque 3.** On remarque que le nombre de  $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$  est bien plus élevé (4 de plus sur 20 bits), que pour la JSF ou pour la *RDR* appliquée à chaque exposant.

### 4.3.2 Contraintes et Objectifs

La *DoubleRDR* est efficace, cependant il y a quelques contraintes pour programmer une telle méthode.

On donne les contraintes liées à la sécurité de l'algorithme dans un premier temps, puis celles liées à la performance dans un second temps.

#### Contraintes liées à la sécurité.

Il y a contraintes liées à la résistance à une attaque par canaux auxiliaires, qui l'objectif principal de la *DoubleRDR*.

- La première condition de la double représentation est l'utilisation de coefficients choisis aléatoirement (l'ensemble  $\overline{\mathcal{D}}$ ).
- Il est important que les résultats ne dépendent pas des coefficients choisis (il faut que les résultats soient similaires lorsqu'on change l'ensemble  $\mathcal{D}$ ).
- La disjonction de cas, lorsque les bits faibles sont égaux ou non, peut poser problème au niveau de la sécurité (car l'utilisation d'un "if" semble nécessaire).

#### Contraintes liées aux performances

- Le choix d'une taille de fenêtre maximale  $W_{max}$  est obligatoire pour choisir les coefficients de la *DoubleRDR*.
- Il faut pouvoir déterminer les prochains bits non nuls de chacun des nombres ( $B_{f,1}$  et  $B_{f,2}$ ), ceci peut être un problème du point de vue de la performance.
- Lorsque  $B_{f,1} \neq B_{f,2}$ , il peut arriver qu'il n'y ait pas de solution au problème :  
Trouver  $d_0 \in \overline{\mathcal{D}}$  tel que :

$$\begin{aligned} 2^\omega &\mid (k_i - d_0) \mod (2^{W_{max}}) \\ 2^{\omega+1} &\nmid (k_i - d_0) \mod (2^{W_{max}}) \end{aligned}$$

C'est une contrainte embarrassante au niveau de la performance (temps de calcul ET nombre de double zéros).

### Objectifs et Définition

Pour rappel, on définit la *DoubleRDR* comme la représentation d'un couple  $(k_1, k_2)$  en base 2 vérifiant ces deux objectifs/conditions principaux :

Objectif 1 Les coefficients de  $k_1$  et  $k_2$  sont choisis tels qu'il y ait le même nombre de 0 consécutifs dans les représentations de  $k_1$  et  $k_2$ .

Objectif 2 Le nombre de  $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$  consécutifs, suivant un bit dont le coefficient est non nul est, maximal.



## Théorie, Implémentation et Optimisation

Dans une première partie, on détaille un premier algorithme de recodage *DoubleRDR*.

Puis dans un second temps, on explique une implémentation plus efficace et optimisée que la précédente.

Finalement, la partie 3 montre dans l'équivalence entre les deux implémentations de la *DoubleRDR*.

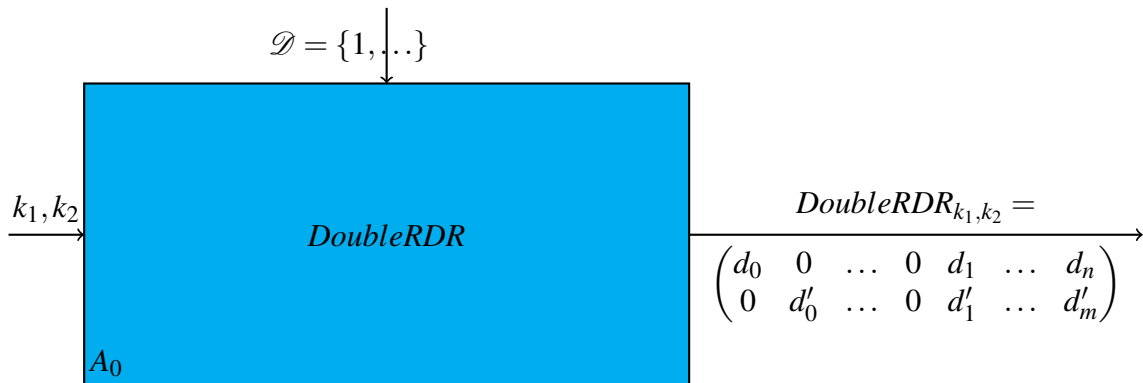
### 5.1 Implémentation de la *DoubleRDR*

Tout d'abord, afin de tester l'efficacité de la *DoubleRDR*, il est important de créer un algorithme permettant d'appliquer la méthode de recodage décrite dans la partie précédente.

Dans tout le chapitre, on note  $k_1$  et  $k_2$  les deux exposants à recoder et  $\mathcal{D}$  l'ensemble des coefficients utilisés dans la représentation.

#### 5.1.1 Squelette et organisation du programme

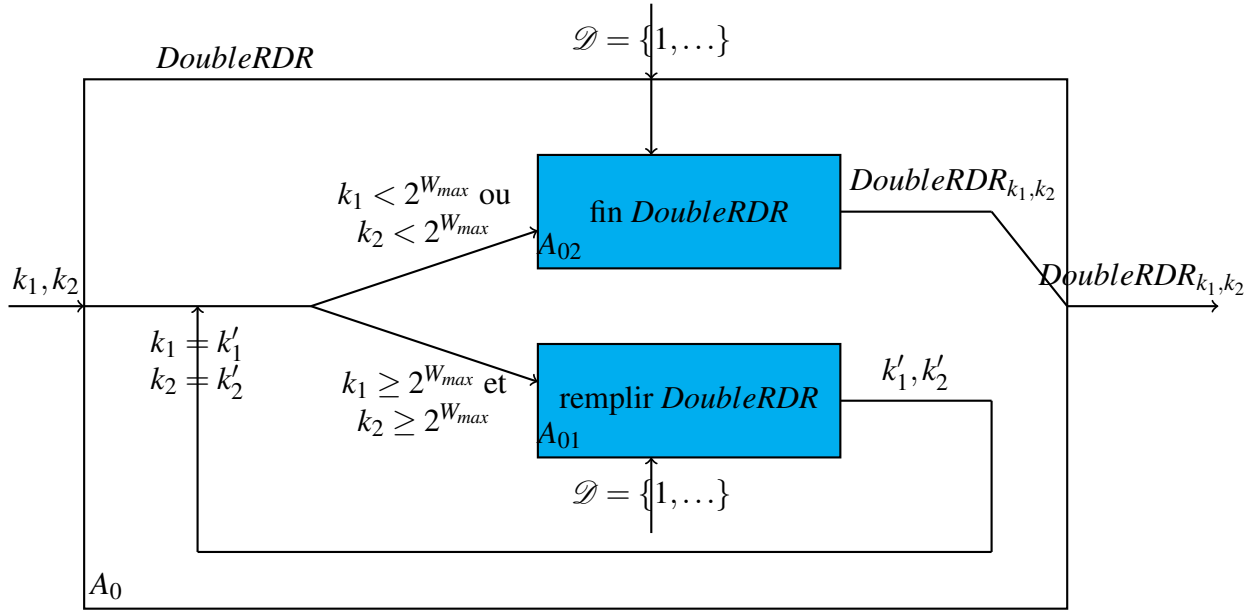
Voici le schéma *SADT* du programme *DoubleRDR* :



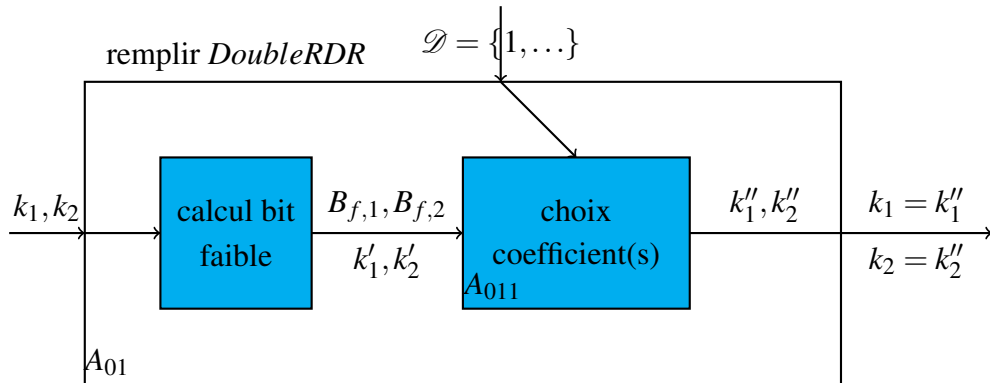
Les entrées du programme sont :

- les exposants  $k_1$  et  $k_2$ ,
- l'ensemble  $\mathcal{D}$  des coefficients possibles.

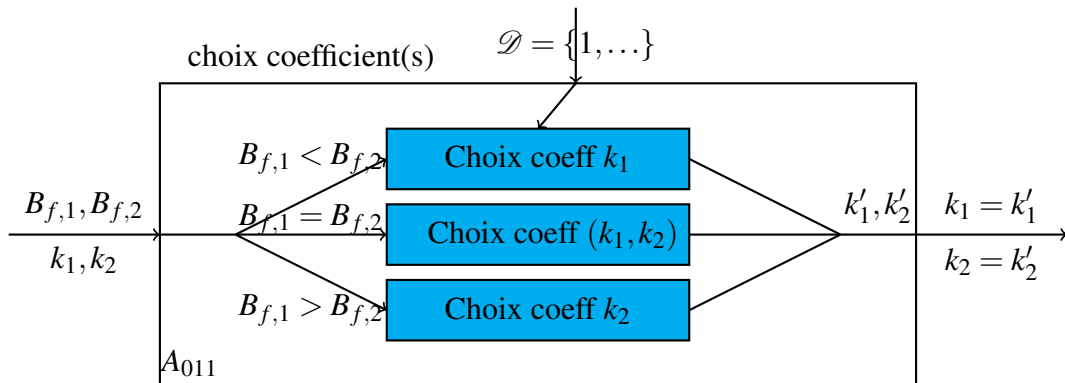
Le programme renvoie un tableau à deux lignes et environ la taille du plus grand nombre parmi  $k_1$  et  $k_2$ .



On remarque qu'il faut fonctionner différemment pour la fin du recodage (ie  $k_i < 2^{W_{max}}$ ), c'est pourquoi le programme applique la méthode *DoubleRDR* en recalculant  $k_1$  et  $k_2$  au fur et à mesure jusqu'à ce que l'un des deux exposants soit petit, on applique alors l'algorithme spécialement conçu pour ce cas particulier.



De la même manière que dans l'exemple, il est très important de calculer les bits faibles de chaque exposant avant de calculer le coefficient associé sous peine de choisir le mauvais coefficient.



On distingue, comme dans la méthode *DoubleRDR*, le cas où  $B_{f,1} = B_{f,2}$  et les cas où  $B_{f,1} \neq B_{f,2}$  (ie  $B_{f,1} < B_{f,2}$  et  $B_{f,1} > B_{f,2}$ )

### 5.1.2 Les algorithmes de calculs

Dans cette partie, on explique l' algorithme de calcul de  $B_{f,i}$ , les algorithmes de choix des coefficients et l' algorithme de fin de la *DoubleRDR*.

#### Calcul de $B_{f,i}$

La première fonction détaillée est la fonction “calcul du bit de poids faible”.

Pour se faire, on divise par 2 l'exposant tant que celui ci est pair, puis on récupère le nombre de division par 2 pour obtenir  $B_f$ , comme détaillée ci-dessous :

---

**Algorithm 7** Algorithme de calcul de  $B_f$  pour  $k$

---

**Require:** l'exposant  $k$ .

**Ensure:** le nombre  $B_f$  et la nouvelle valeur de l'exposant  $k$ , noté  $k'$ .

```

 $B_f \leftarrow 0$ 
 $k' \leftarrow k$ 
while  $k' > 1$  do
   $k' \leftarrow \frac{k'}{2}$ 
   $B_f \leftarrow B_f + 1$ 
end while
return  $[B_f, k']$ 

```

---

#### Choix des coefficients

On présente les 3 algorithmes de choix des coefficients.

L'algorithme pour le cas où  $B_{f,1} < B_{f,2}$  est l'algorithme 8.

- L'algorithme calcule d'abord l'ensemble  $k_1 - \overline{\mathcal{D}}$  (comme dans l'exemple),
- puis en fixant  $pow_1 = 2^\omega$ , l'algorithme cherche un coefficient  $d_0$  tel que :  
 $pow_1 \mid (k_1 - d_0)$  et  $pow_2 = 2 \times pow_1 \nmid (k_1 - d_0)$ ,
- s'il y a une solution, le programme renvoie  $d_0$ , sinon on décremente  $\omega$  jusqu'à trouver un coefficient  $d_0$  vérifiant  $pow_1 \mid (k_1 - d_0)$  et  $pow_2 = 2 \times pow_1 \nmid (k_1 - d_0)$ .

Pour le cas où  $B_{f,1} > B_{f,2}$ , il suffit d'utiliser le même algorithme en remplaçant  $k_1$  par  $k_2$  et en inversant les rôles de  $B_{f,1}$  et  $B_{f,2}$ .

---

**Algorithm 8** Algorithme de calcul de  $d_0$  lorsque  $B_{f,1} < B_{f,2}$ 

---

**Require:** l'exposant  $k_1$ , les bits  $B_{f,1}$  et  $B_{f,2}$ , et l'ensemble  $\overline{\mathcal{D}}$  avec  $Wn$  (borne).

**Ensure:**  $d_0$  avec  $d_0 \in \overline{\mathcal{D}}$ .

**for**  $i$  allant de 0 à  $|\overline{\mathcal{D}}| - 1$  **do**

$KmoinsDbarre[i] \leftarrow k_1 - \overline{\mathcal{D}}[i]$  // l'ensemble  $k_1 - \overline{\mathcal{D}}$  de l'exemple

**end for**

$\omega \leftarrow B_{f,2} - B_{f,1}$

$pow_1 \leftarrow 2^\omega \bmod 2^{W_{max}}$  // on a  $pow_1 = 2^\omega$ , puis  $pow_1 = 2^{\omega-1}$  si on ne trouve pas de solution, etc ...

$pow_2 \leftarrow pow_1 \times 2 \bmod 2^{W_{max}}$

$c \leftarrow 0$

**while**  $pow_1 > 1$  et  $c = 0$  **do**

$i \leftarrow 0$

**while**  $i < |\overline{\mathcal{D}}|$  et  $c = 0$  **do**

$S \leftarrow KmoinsDbarre[i] \bmod 2^{W_{max}}$

**if**  $S = 0 \bmod pow_1$  et  $S \neq 0 \bmod pow_2$  **then**

$d_0 \leftarrow \overline{\mathcal{D}}[i]$

$c \leftarrow 1$

**end if**

$i \leftarrow i + 1$

**end while**

$pow_1 \leftarrow \frac{pow_1}{2}$

$pow_2 \leftarrow \frac{pow_2}{2}$

**end while**

**return**  $d_0$

---

L'algorithme pour le cas où  $B_{f,1} = B_{f,2}$  est l'algorithme 9.

Pour se faire, on réutilise la méthode de l'exemple :

- L'algorithme calcule  $k_1 - \overline{\mathcal{D}}$  et  $k_2 - \overline{\mathcal{D}}$ , puis on cherche  $\omega_{max}$  correspondant à ces deux ensembles.
- Pour cela, on initialise  $\omega$  à  $Wn + 2$  ( $W_{max}$ ) et on regarde dans le premier ensemble si  $2^\omega$  divise l'un des éléments, puis dans le deuxième ensemble.
- L'algorithme s'arrête uniquement au moment où  $2^\omega$  divise un élément de chacun des ensembles, et tel que  $2^{\omega+1}$  ne divise pas ces éléments.
- La deuxième boucle (celle avec la variable  $i$ ) correspond à la recherche d'un  $2^\omega$  divisant un élément de  $k_1 - \overline{\mathcal{D}}$ .
- La troisième boucle (celle avec la variable  $j$ ) correspond à la recherche d'un  $2^\omega$  divisant un élément de  $k_2 - \overline{\mathcal{D}}$ .
- La première boucle (celle avec la variable  $pow$ ) correspond à la recherche du  $w_{max}$  commun aux deux ensembles.

---

**Algorithm 9** Algorithme de calcul de  $d_0$  et  $d'_0$  lorsque  $B_{f,1} = B_{f,2}$ 

---

**Require:** les exposants  $k_1$  et  $k_2$  et l'ensemble  $\overline{\mathcal{D}}$  avec  $Wn$  (borne).**Ensure:**  $[d_0, d'_0]$  avec  $d_0, d'_0 \in \overline{\mathcal{D}}$ .**for**  $i$  allant de 0 à  $|\overline{\mathcal{D}}| - 1$  **do** $KmoinsDbarre_1[i] \leftarrow k_1 - \overline{\mathcal{D}}[i]$  // l'ensemble  $k_1 - \overline{\mathcal{D}}$ **end for****for**  $i$  allant de 0 à  $|\overline{\mathcal{D}}| - 1$  **do** $KmoinsDbarre_2[i] \leftarrow k_2 - \overline{\mathcal{D}}[i]$  // l'ensemble  $k_2 - \overline{\mathcal{D}}$ **end for** $pow \leftarrow 2^{Wn+2}$  // la variable  $pow$  correspond à  $w_{max}$  $c \leftarrow 0$  // valeur d'arrêt qui arrête le programme quand on trouve les coefficients**while**  $pow > 1$  et  $c \neq 1$  **do** $c_1 \leftarrow 0$  // valeur d'arrêt pour  $d_0$  $c_2 \leftarrow 0$  // valeur d'arrêt pour  $d'_0$  $i \leftarrow 0$ **while**  $i < |\overline{\mathcal{D}}|$  et  $c_1 \neq 1$  **do** $S \leftarrow KmoinsDbarre_1[i]$ **if**  $S = 0 \pmod{pow}$  et  $S \neq 0 \pmod{2 \times pow}$  **then** $c_1 \leftarrow 1$ **end if** $i \leftarrow i + 1$ **end while** $j \leftarrow 0$ **while**  $j < |\overline{\mathcal{D}}|$  et  $c_2 \neq 1$  **do** $S \leftarrow KmoinsDbarre_2[j]$ **if**  $S = 0 \pmod{pow}$  et  $S \neq 0 \pmod{2 \times pow}$  **then** $c_2 \leftarrow 1$ **end if** $j \leftarrow j + 1$ **end while** $pow \leftarrow \frac{pow}{2}$  $c \leftarrow c_1 \times c_2$  //  $c$  vaut 1 uniquement lorsque  $c_1$  et  $c_2$  valent 1**end while** $d_0 \leftarrow \overline{\mathcal{D}}[i - 1]$  $d'_0 \leftarrow \overline{\mathcal{D}}[j - 1]$ **return**  $[d_0, d'_0]$ 

---

## 5.2 De l'arithmétique à l'optimisation

Une fois programmé, la méthode montre des résultats intéressants en terme de nombre de  $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ , cependant l'algorithme utilisé servant à améliorer la vitesse d'exécution de l'exponentiation, il est nécessaire de se précoccuper de la vitesse d'exécution de ce dernier et pour l'heure, le programme est plutôt lent, notamment pour des nombres grands ou lorsqu'il s'agit d'effectuer un nombre conséquent de tests.

Dans cette partie, j'expliquerai par quel procédé j'ai optimisé l'algorithme de la partie précédente.

Finalement, l'équivalence entre les deux algorithmes et sa preuve seront détaillées dans la partie suivante.

### 5.2.1 La recherche dans un tableau, procédé à éviter

De la même manière que pour la RDR, on cherche à éviter la recherche dans un tableau, et donc de la même manière, j'ai pensé à créer un tableau *DoubleDmax*, dans lequel on récupère les coefficients  $d_0$  et  $d'_0$  quand il le faut.

### 5.2.2 Existence du tableau *DoubleDmax*

La première question que l'on peut se poser concernant l'optimisation est :

Est-ce que la création d'un tel tableau est faisable ? En d'autres termes, ce tableau existe-t-il et peut-on le construire facilement ?

Voici plusieurs raisons qui m'ont donné l'intuition que tout cela était possible :

- 1) C'est le cas pour la RDR.
- 2) Les coefficients  $d_0$  et  $d'_0$  sont déterminés uniquement avec  $k_1 - \overline{\mathcal{D}}$  et  $k_2 - \overline{\mathcal{D}}$ , et donc uniquement avec  $k_1$  et  $k_2$  lorsque  $\overline{\mathcal{D}}$  ne change pas.
- 3) On observe les deux exposants sur une fenêtre maximale, les coefficients ne dépendent uniquement de leurs valeurs sur cette fenêtre.

### 5.2.3 Création du tableau *DoubleDmax*

Le premier constat concernant la création de *DoubleDmax* est qu'il est constitué de deux entrées,  $k_1$  et  $k_2$ .

Etant donné que dans tous les cas (choix de  $d_0$  ou choix du couple  $(d_0, d'_0)$ ), les deux exposants définissent le choix des coefficients.

Tout d'abord, avec ce constat, on remarque qu'il y a  $2^{W_{n+2}}$  possibilités pour  $k_1$  et  $k_2$ , ce qui fait exactement  $2^{2W_{n+4}}$  pour le couple  $(k_1, k_2)$ , et je suis donc parti sur la construction d'un tableau à  $2^{W_{n+2}}$  lignes et  $2^{W_{n+2}}$  colonnes et où chaque case contiendrait un couple  $(d_0, d'_0)$ .

### 5.2.4 Initialisation du tableau *DoubleDmax*

Le deuxième constat que j'ai fait concerne les 0 qui rempliront le tableau.

Naturellement, dès que  $k_1$  ou  $k_2$  est pair, le coefficient associé  $d_0$  est logiquement nul. Ainsi par

un soucis d'efficacité, j'initialise *DoubleDmax* à 0 absolument partout, et je modifierai donc les coefficients nuls pour lesquels  $k_1$  ou  $k_2$  est impair.  
Il y a donc  $2^{2Wn+3}$  coefficients à remplacer (exactement la moitié).

### 5.2.5 Remplissage partiel du tableau *DoubleDmax*

Etant donné que chacun des algorithmes utilisent des boucles déterminées par la variable *pow* qui représente la puissance de 2 qui divise  $k \bmod [2^{Wn+2}]$ , il semble évident que la construction de *DoubleDmax* se fasse avec cette même boucle.

Le raisonnement du premier algorithme correspond au soucis de vouloir obtenir le plus grand nombre de  $\binom{0}{0}$  possibles à la suite, et le fait de vouloir commencer par la plus grande puissance de 2 possible ( $2^{Wn+2}$ ) pour remplir le tableau n'y est pas anodin.

Ainsi, on commence par remplir les cases du tableaux avec  $\overline{\mathcal{D}}$ , plus exactement on remplit les cases  $(d_0 = \overline{\mathcal{D}}[i], d'_0 = \overline{\mathcal{D}}[j])$  où  $0 \leq i, j < |\overline{\mathcal{D}}|$ , correspondant à la ligne  $\overline{\mathcal{D}}[i]$  et à la colonne  $\overline{\mathcal{D}}[j]$ . Ce qui constitue la première étape (que je noterai  $(\mathcal{D}, \mathcal{D})$ , qu'on peut interpreter comme l'étape  $(\mathcal{D} + 2^{Wn+2}, \mathcal{D} + 2^{Wn+2})$ .

Puis, on continue avec cette fois ci  $pow = 2^{Wn+1}$ . On remplit les cases  $(d_0 = \overline{\mathcal{D}}[i] + 2^{Wn+1} \bmod [2^{Wn+2}], d'_0 = \overline{\mathcal{D}}[j] + 2^{Wn+1} \bmod [2^{Wn+2}])$ , c'est-à-dire qu'on s'occupe de  $(\mathcal{D} + 2^{Wn+1}, \mathcal{D} + 2^{Wn+1})$ .

En réitérant le procédé jusqu'à ce que  $pow = 2$ , on remplit ainsi toutes les cases *impaires* du tableau (lignes et colonnes impaires).

Avec cette méthode, j'ai rempli les cases qui me permettront de traiter les cas où, c'est-à-dire le fameux deuxième cas. Voyons comment traiter le premier cas.

### 5.2.6 Fin du remplissage de *DoubleDmax*

Il reste à remplir les cases des lignes paires et des colonnes impaires, et inversement, ce qui correspond au premier cas dans le squelette de l'algorithme (c'est-à-dire le cas où  $B_{f,1} < B_{f,2}$  et inversement).

Pour se faire, il faut donc que, lorsque  $k_1$  a 3 zéros consécutifs dans sa représentation et que  $k_2$  a le premier bit non nul, l'on choisisse un coefficient  $d'_0$  pour  $k_2$  (et  $d_0 = 0$  pour  $k_1$ ) tel que  $\frac{k_2 - d'_0}{2}$  ait deux 0 consécutifs.

Ce qui revient à dire, si  $k_1$  est divisible par 8 (équivalent à avoir 3 zéros consécutifs), alors il faudra choisir  $d'_0$  tel que  $k_2 - d'_0$  soit divisible par 8.

On peut donc procéder de la même manière que pour le remplissage précédent.

Afin de traiter ce cas, il suffit de prendre un exemple afin d'éclairer les lanternes du lecteur.

Soit  $\overline{\mathcal{D}} = \{1, 3, 23, 27, 37, 41, 61, 63\}$ ,

$k_1$  et  $k_2$  tels que  $k_1 = 24 \bmod 64$  et  $k_2 = 21 \bmod 64$ .

Comme  $k_1 \bmod 64$  est divisible par 8,  $k_1$  l'est aussi, et de même  $k_1 \bmod 64$  n'est pas divisible par 16,  $k_1$  ne l'est pas non plus.

Et donc le premier bit faible de  $k_1$  est le quatrième.

Comme  $k_2$  est impaire, son premier bit est non nul.

$$\begin{aligned} k_1 &= (0 & 0 & 0 & 1 & \dots \\ k_2 &= (1 & a_0 & a_1 & a_2 & \dots \end{aligned}$$

Ainsi, nous voici dans le fameux premier cas, où  $B_{f,1} = 3$  et  $B_{f,2} = 0$ .  
Or on a  $k_2 = 21 = -3 + 24 \text{ Mod } 64$ . Et donc  $k_2 - (-3)$  divisible par 8.  
Donc on remplit la case  $(24, 21)$  du tableau *DoubleDmax* avec  $(0, -3)$ .  
Plus généralement, on remplit les cases  $(0, \overline{\mathcal{D}})$ , puis  $(0 + 2^{W_{n+1}}, \overline{\mathcal{D}} + 2^{W_{n+1}})$ ,  
 $(0 + 2^{W_n}, \overline{\mathcal{D}} + 2^{W_n})$ , et ainsi de suite jusqu'à  $(0 + 2^1, \overline{\mathcal{D}} + 2^1)$ .

### 5.2.7 Astuces

La première chose que l'on constate dans l'explication de l'algorithme de la partie précédente, est que le premier et le deuxième cas sont traités de la même manière, ce qui change c'est que pour le premier cas, on utilise 0 d'un côté et  $\overline{\mathcal{D}}$  de l'autre.

J'ai donc utilisé une astuce pour regrouper ces deux cas en un seul et même programme, j'ai ajouté 0 à  $\overline{\mathcal{D}}$  afin de pouvoir traiter le cas où l'un des deux exposants est pair.

Ensuite, j'ai également utilisé une deuxième astuce, pour économiser le nombre de calculs nécessaires pour remplir ce tableau.

Je me suis aperçu qu'il n'y avait pas besoin de calculer tous les ensembles  $(\mathcal{D} + 2^k, \mathcal{D} + 2^k)$ , par exemple pour  $\overline{\mathcal{D}} = \{1, 3, 23, 27, 37, 41, 61, 63\}$ , le tableau *DoubleDmax* peut se remplir avec  $(\mathcal{D} + 2^k, \mathcal{D} + 2^k)$ , pour  $k \geq 3$ .

J'ai donc pensé à mettre un compteur afin d'arrêter le programme dès que le tableau est rempli.

Finalement, avec ce compteur, je me suis rendu compte que je n'avais pas assez d'éléments dans mon tableau.

En observant les résultats, j'ai remarqué que certains des cas  $k_1$  pair et  $k_2$  impair (et inversement) n'avaient pas été remplis.

Cela s'explique très simplement, prenons un exemple, mettons avec le même  $\overline{\mathcal{D}}$ , et cette fois prenons  $k_1 = 32$  et  $k_2 = 7$ , on remarque qu'il n'existe pas de solution  $(d_0, d_1)$  à :

$$k_2 = d_0 + 32 \times d_1 [64]$$

Plus exactement, si on calcule l'ensemble  $k_2 - \overline{\mathcal{D}}$ , on s'aperçoit qu'aucun élément n'est divisible par 32. C'est un cas particulier, et dans ce cas, nous avons décidé de choisir la puissance de 2 inférieure la plus proche divisant un des éléments de l'ensemble. Dans ce cas précis, c'est 8.

Il faudra donc rajouter une partie du programme qui traitera ces cas particuliers.

La dernière astuce me permet de réduire considérablement la taille du tableau, et ainsi les calculs.

En remarquant que les résultats étaient symétriques (les couples  $(43, 21)$  et  $(21, 43)$  renvoient les mêmes coefficients), j'ai donc décidé d'associer le coefficient de la case  $(k_1, k_2)$  à  $k_1$  et celui de la case  $(k_2, k_1)$  à  $k_2$ .

### 5.2.8 Algorithmes

Voici les différents algorithmes traitant la création et le remplissage du tableau *DoubleDmax*.

#### Création de *DoubleDmax*

Pour créer un tableau à  $2^{W_n+2}$  lignes et  $2^{W_n+2}$  colonnes, il suffit d'allouer la bonne mémoire à un pointeur de pointeurs, puis de faire une boucle pour allouer la mémoire suffisante à tous les pointeurs.



---

**Algorithm 10** Algorithme de création de *DoubleDmax*

---

**Require:**  $W_n$ .

**Ensure:** le tableau *DoubleDmax* vide.

$pow \leftarrow 2^{W_n+2}$

$**DoubleDmax = \text{malloc}(pow \times \text{sizeof}(*DoubleDmax))$  {création d'un tableau contenant  $pow$  lignes}

**for**  $i$  allant de 0 à  $pow - 1$  **do**

$*DoubleDmax[i] = \text{malloc}(pow \times \text{sizeof}(*DoubleDmax))$  {allocation de chaque ligne d'une taille  $pow$  fois la taille d'un élément (un *int* dans notre cas)}

**end for**

**return** *DoubleDmax*

---

### Remplissage de *DoubleDmax* : Première partie

Dans un premier temps, il s'agit de remplir *DoubleDmax* pour tous les cas où  $k_1$  et  $k_2$  sont impairs, mais également tous les cas où seulement l'un des deux est impair et qu'il existe  $d_0, d_1 \in \mathcal{D}$  tels que :

$$\begin{aligned} k_1 &= d_0 + 2^k \times d_1 [2^{W_n+2}] \text{ ou} \\ k_2 &= d_0 + 2^k \times d_1 [2^{W_n+2}] \end{aligned}$$

### Remplissage de *DoubleDmax* : Deuxième partie

Il ne reste plus qu'à traiter le cas où l'un des deux exposants est impair et qu'il n'y a pas de solution à l'équation :

$$\begin{aligned} k_1 &= d_0 + 2^k \times d_1 [2^{W_n+2}] \text{ ou} \\ k_2 &= d_0 + 2^k \times d_1 [2^{W_n+2}] \end{aligned}$$

## 5.3 Equivalence et preuve

Les deux algorithmes expliqués précédemment semble équivalent, il reste désormais à prouver cette équivalence.

### 5.3.1 La *DoubleRDR*, késako ?

**Definition 1.** La *DoubleRDR* d'un couple d'exposant est une représentation de ce couple en base 2 telle que :

- Les coefficients sont choisis aléatoirement inférieurs à une borne prédéfinie, leur nombre est également prédéfini.
- Il y a un ratio  $\frac{\text{coefficients non nuls sur le même bit}}{\text{coefficients non nuls}}$  maximum (le plus proche de 1 possible).
- Il y a un maximum de  $\binom{0}{0}$  dans le respect des deux premières règles.

---

**Algorithm 11** Algorithme de remplissage de *DoubleDmax*

---

**Require:** un compteur  $c$ , une puissance  $2^k$ , l'ensemble  $\overline{\mathcal{D}}$  avec  $Wn$  (borne) et le tableau *DoubleDmax*.

**Ensure:** *DoubleDmax* partiellement rempli.

```
for  $i$  allant de 0 à  $|\overline{\mathcal{D}}| - 1$  do
   $d_1 \leftarrow \overline{\mathcal{D}}[i]$ 
   $k_1 \leftarrow 0$ 
   $pow_1 \leftarrow 2^k$ 
  while  $k_1 < \frac{2^{Wn+2}}{2 \times 2^k} + 1$  do
     $d_1 \leftarrow d_1 + pow_1 \text{ Mod } 2^{Wn+2}$ 
    for  $j$  allant de 0 à  $|\overline{\mathcal{D}}|$  do
       $d_2 \leftarrow \overline{\mathcal{D}}[j]$ 
       $pow_2 \leftarrow 2^k$ 
       $k_2 \leftarrow 0$ 
      while  $k_2 < \frac{2^{Wn+2}}{2 \times 2^k} + 1$  do
         $d_2 \leftarrow d_2 + pow_2 \text{ Mod } 2^{Wn+2}$ 
        if DoubleDmax[ $d_1$ ][ $d_2$ ] = 0 then
          if  $i < |D|$  then
            DoubleDmax[ $d_1$ ][ $d_2$ ] =  $D[i]$ 
          else
            DoubleDmax[ $d_1$ ][ $d_2$ ] =  $-D[i - |D|]$ 
          end if
        else if DoubleDmax[ $d_2$ ][ $d_1$ ] = 0 et  $d_2$  impair then
          if  $j < |D|$  then
            DoubleDmax[ $d_2$ ][ $d_1$ ] =  $D[j]$ 
          else
            DoubleDmax[ $d_2$ ][ $d_1$ ] =  $-D[j - |D|]$ 
          end if
        end if
       $k_2 \leftarrow k_2 + 1$ 
       $pow_2 \leftarrow 2 \times 2^k$ 
    end while
  end for
   $k_1 \leftarrow k_1 + 1$ 
   $pow_1 \leftarrow 2 \times 2^k$ 
end while
end for
return DoubleDmax
```

---

---

**Algorithm 12** Algorithme de complétion de *DoubleDmax*

---

**Require:** un compteur  $c$ , une puissance  $2^k$ , l'ensemble  $\overline{\mathcal{D}}$  avec  $Wn$  (borne).

**Ensure:** *DoubleDmax* avec  $d_0, d'_0 \in \overline{\mathcal{D}}$ .

```
pow ← 2Wn+2
c ← 0
while pow > 1 et c ≠ 1 do
  c1 ← 0
  c2 ← 0
  i ← 0
  while i < | $\overline{\mathcal{D}}$ | et c1 ≠ 1 do
    S ← k1 −  $\overline{\mathcal{D}}$ [i]
    if S[pow] = 0 et S[2 × pow] ≠ 0 then
      c1 ← 1
    end if
    i ← i + 1
  end while
  j ← 0
  while j < | $\overline{\mathcal{D}}$ | et c2 ≠ 1 do
    S ← k2 −  $\overline{\mathcal{D}}$ [j]
    if S[pow] = 0 et S[2 × pow] ≠ 0 then
      c2 ← 1
    end if
    j ← j + 1
  end while
  pow ←  $\frac{pow}{2}$ 
  c ← c1 × c2
end while
d0 ←  $\overline{\mathcal{D}}$ [i − 1]
d'0 ←  $\overline{\mathcal{D}}$ [j − 1]
return [d0, d'0]
```

---

**Remarque 4.** Dans l'exemple de la partie 4, le ratio est de  $\frac{5}{7}$  (7 bits non nuls dont 2 de la forme  $\begin{pmatrix} d_0 \\ 0 \end{pmatrix}$  ou  $\begin{pmatrix} 0 \\ d_0 \end{pmatrix}$ , où  $d_0 \neq 0$ ).

**Proposition 2.** Une représentation de  $(k_1, k_2)$ , de la forme

$$\begin{aligned} k_1 &= (d_0 \ \dots \ d_k \ \dots \ d_n) \\ k_2 &= (d'_0 \ \dots \ d'_k \ \dots \ d'_m) \end{aligned}$$

est la *DoubleRDR* de ce couple si et seulement si :

- $d_i, d'_i \in \overline{\mathcal{D}} \cup \{0\}$ , pour tout  $i$ .
- $(d_i, d'_i)$  sont tels que :  
S'il existe  $\omega \leq W_n$  tel que :  
Il existe  $d \in \overline{\mathcal{D}} \cup \{0\}$  tel que  $2^\omega \mid (a - d)$  et  $2^{\omega+1} \nmid (a - d)$

*Il existe  $d' \in \overline{\mathcal{D}} \cup \{0\}$   $2^\omega \mid (b - d')$  et  $2^{\omega+1} \nmid (b - d')$*

*Alors on a  $d_0 = d$  et  $d'_0 = d'$ .*

*Si un tel  $\omega$  n'existe pas, alors on cherche le plus grand  $\omega$  tel que :*

*Il existe  $d \in \overline{\mathcal{D}} \cup \{0\}$  tel que  $2^\omega \mid (a - d)$  et  $2^{\omega+1} \nmid (a - d)$*

*Puis on cherche le plus grand  $\omega'$  tel que :*

*Il existe  $d' \in \overline{\mathcal{D}} \cup \{0\}$  tel que  $2^{\omega'} \mid (b - d')$  et  $2^{\omega'+1} \nmid (b - d')$*

*Alors on a  $d_0 = d$  et  $d'_0 = d'$ .*

**Remarque 5.** *Il est facile de constater que lorsque  $a$  et  $b$  sont impairs, il existe toujours  $1 \leq \omega \leq W_n$  vérifiant la première condition.*

*En effet, il suffit de remarquer que, étant donné que  $1 \in \mathcal{D}$ , il suffit de prendre  $d_0 = 1$  si  $(a - 1)$  divisible par 2 mais non par 4, et  $d_0 = -1$  dans le cas contraire. De la même manière pour  $b$ , on obtient  $(a - d_0)$  et  $(b - d'_0)$  divisible par 2 et non par 4.*

*Finalement, le seul cas où la condition (i) n'est pas vérifiée est lorsque l'un des deux exposants est pair et l'autre impair.*

### 5.3.2 Algorithme et Mathématiques

## Performances et Aléatoire : l'importance des coefficients

L'algorithme et la méthode sont optimisés, cependant un paramètre important n'a pas encore été discuté, quels sont les performances (en terme de  $\binom{0}{0}$ ) de la *DoubleRDR* ?

L'objectif le plus important de ce recodage est d'être résistant à une attaque par canal auxiliaire. Pour se faire, il est nécessaire que les résultats obtenus diffèrent peu suivant les coefficients choisis, car des variations trop importantes donneraient systématiquement des éléments sur l'exposant (et donc le secret !).

### 6.1 L'important choix des coefficients

Nous allons voir dans cette partie, l'étude complète des coefficients de  $\mathcal{D}$  pour certains paramètres de l'algorithme.

#### 6.1.1 Deux choix , deux résultats

J'ai remarqué rapidement que le choix de l'ensemble  $\mathcal{D}$  influait grandement les performances de l'algorithme.

Pour se faire, j'expose un exemple avec deux choix de coefficients particulièrement significatifs.

J'ai effectué 1000 tests par choix, pour des exposants de 4096 bits, et pour  $|\mathcal{D}| = 4$ .

Pour  $\mathcal{D} = \{1, 3, 23, 27\}$ , le nombre moyen de  $\binom{0}{0}$  est 2926.

Pour  $\mathcal{D} = \{1, 15, 17, 31\}$ , le nombre moyen de  $\binom{0}{0}$  est 1566.

Ce constat est problématique, deux questions se posent alors, quelle est l'influence des coefficients sur les performances de l'algorithme ? D'où vient cette incroyable disparité ?

La partie suivante s'attache à donner un élément de réponse à la première question.

#### 6.1.2 Etude sur les coefficients

Pour effectuer les tests, j'ai choisi de bloquer certains paramètres afin d'observer l'influence des coefficients de  $\mathcal{D}$  sur les résultats du recodage. J'ai fixé la taille et la borne de  $\mathcal{D}$  à 4 et

à 32 respectivement, et la taille des exposants est fixée à 4096. Une fois tous ces paramètres fixés, j’ai testé tous les coefficients, c’est-à-dire tous les ensembles  $\mathcal{D}$  possibles, il y en a 455 (3 parmi 15).

J’ai rangé les résultats en 5 catégories distinctes que j’ai classées dans le tableau ci-dessous.

TABLE 6.1 : Performances suivant  $\mathcal{D}$  (1000 tests)

Nombre de $\binom{0}{0}$	Pourcentages de $\binom{0}{0}$	Nombre de $\mathcal{D}$	Pourcentages de $\mathcal{D}$
$x > 2900$	[70.8; 100]	63	13.8
$2900 > x > 2800$	[68.4; 70.8[	193	42.4
$2800 > x > 2700$	[65.9; 68.4[	96	21.1
$2700 > x > 2500$	[61; 65.9[	68	14.9
$x < 2500$	[0; 61[	35	7.7

### 6.1.3 Conséquences

Une fois ces résultats obtenus, j’ai automatiquement contacté mon superviseur pour le prévenir des ces différences importantes dans les performances de l’algorithme. Nous avons donc cherché une solution et avons noté les possibilités qui s’offraient à nous, ainsi que les problèmes liés à ce tableau statistique.

Les difficultés que nous avons listés sont les suivantes :

- Certains résultats sont en dessous des performances que l’on cherche à obtenir.
- Ne pas prendre toutes les possibilités de coefficients entraine une baisse de sécurité car il y a une baisse d’aléatoire.
- Il n’est pas certain que nous puissions identifier les coefficients par catégorie, encore moins par les catégories que j’ai moi-même définies.

Face à ces observations, nous avons listé plusieurs possibilités :

Piste 1 : La *DoubleRDR*, on randomise le choix des coefficients sans faire aucune sélection.

Avantage : Résistant à “Side Channel Attack”.

Problème : Résultats très différents selon les coefficients, parfois une perte importante d’efficacité.

Piste 2 : La *Double semi – RDR*, on randomise le choix des coefficients en sélectionnant au préalable les coefficients qui fonctionnent le mieux, ou non , cette sélection définit ainsi le niveau de performance et le niveau de sécurité que l’on met dans l’algorithme.

Avantage : Adaptable, plus performant que la *DoubleRDR*.

Problème : Moins résistant à “Side Channel Attack” que la *DoubleRDR*.

Piste 3 : Le *Double – wNAF*, on ne randomise absolument rien, le choix des coefficients correspond à tous les nombres impairs entre 1 et la borne de  $\mathcal{D}$ , à la manière du *wNAF* pour l'exponentiation.

Avantage : Optimal au point de vue performance, pas d'appel à la fonction aléa.

Problème : Pas résistant à "Side Channel Attack".

Nous avons décidé, Nicolas et moi-même, de partir sur la piste 2 proposant plus de choix. La question qui s'est présentée à nous fût alors, est-il possible de ranger les coefficients de  $\mathcal{D}$  et si oui, comment ?

## 6.2 Liens entre les coefficients

Afin de répondre à la question de la partie précédente, j'ai observé attentivement les résultats du tableau statistique sur les coefficients, et j'ai commencé par noter tous les ensembles  $\mathcal{D}$  donnant des performances optimums. En regardant attentivement ces coefficients, j'ai pu découvrir le lien qui liait tous les quadruplets de  $\mathcal{D}$  entre eux.

### 6.2.1 Les coefficients "optimums"

Pour rappel, j'ai fixé la borne de  $\mathcal{D}$  à 32, sa taille à 4, et 1 est obligatoirement fixé.

J'ai commencé par noter tous les  $\mathcal{D}$  possibles pour chaque niveau de performance.

Pour le premier niveau, voilà ce que j'ai obtenu :

TABLE 6.2 : Ensembles  $\mathcal{D}$  pour performances optimales

63 ensembles donnant les meilleurs résultats (> 2900)				
1, 3, 5, 9	1, 3, 5, 23	1, 3, 5, 25	1, 3, 7, 11	1, 3, 7, 21
1, 3, 7, 27	1, 3, 9, 11	1, 3, 9, 21	1, 3, 9, 27	1, 3, 11, 23
1, 3, 11, 25	1, 3, 21, 23	1, 3, 21, 25	1, 3, 23, 27	1, 3, 25, 27
1, 5, 7, 13	1, 5, 7, 19	1, 5, 7, 29	1, 5, 9, 13	1, 5, 9, 19
1, 5, 9, 29	1, 5, 13, 23	1, 5, 13, 25	1, 5, 19, 23	1, 5, 19, 25
1, 5, 23, 29	1, 5, 25, 29	1, 7, 11, 13	1, 7, 11, 19	1, 7, 11, 29
1, 7, 13, 21	1, 7, 13, 27	1, 7, 19, 21	1, 7, 19, 27	1, 7, 21, 29
1, 7, 27, 29	1, 9, 11, 13	1, 9, 11, 19	1, 9, 11, 29	1, 9, 13, 21
1, 9, 13, 27	1, 9, 19, 21	1, 9, 19, 27	1, 9, 21, 29	1, 9, 27, 29
1, 11, 13, 23	1, 11, 13, 25	1, 11, 19, 23	1, 11, 19, 25	1, 11, 23, 29
1, 11, 25, 29	1, 13, 21, 23	1, 13, 21, 25	1, 13, 23, 27	1, 13, 25, 27
1, 19, 21, 23	1, 19, 21, 25	1, 19, 23, 27	1, 19, 25, 27	1, 21, 23, 29
1, 21, 25, 29	1, 23, 27, 29	1, 25, 27, 29		

Tous ces quadruplets ont un point commun, lorsqu'on regarde la congruence modulo 16, on obtient systématiquement l'ensemble  $\{\bar{1}, \pm\bar{3}, \pm\bar{5}, \pm\bar{7}\}$ .

Par exemple,  $\{1, 3, 5, 9\} \text{ Mod } (16) = \{\bar{1}, \bar{3}, \bar{5}, -\bar{7}\}$ ,  
et  $\{1, 11, 25, 29\} \text{ Mod } (16) = \{\bar{1}, -\bar{5}, -\bar{7}, -\bar{3}\}$ .

Ainsi pour définir le niveau optimal pour ces paramètres, il suffit de prendre  $\mathcal{D} = \{1, d_1, d_2, d_3\}$  tel que :

$$\begin{aligned} d_1 &= \pm 3 \text{ Mod}(2^4) \\ d_2 &= \pm 5 \text{ Mod}(2^4) \\ d_3 &= \pm 7 \text{ Mod}(2^4) \end{aligned}$$

On a donc 4 possibilités pour chaque coefficient  $d_1$ ,  $d_2$  et  $d_3$  (par exemple 3, 13, 19 et 29 pour  $d_1$ ), ce qui fait en tout 64 possibilités, au lieu de 63. Il s'agit de remarquer que 1, 3, 5, 7 n'est pas dans cette catégorie, du fait qu'aucun des éléments ne dépassent 8.

## 6.2.2 Les autres coefficients

La partie précédente a permis de remarquer qu'il y avait un lien arithmétique entre tous ces coefficients. Je ne détaillerai pas le raisonnement pour les autres catégories de coefficients.

### Level 3 : un intrus

Après le *Double – wNAF* (Level 1), et la *DoubleRDR* avec les coefficients optimums (Level 2), il s'agit de trouver le lien entre les coefficients de la deuxième ligne du tableau ( $2900 > x > 2800$ ), qui contient 193 possibilités pour  $\mathcal{D}$ , soit environ 42% de l'ensemble des  $\mathcal{D}$  possibles.

Le premier quadruplet de l'ensemble est 1, 3, 5, 7, qui n'est pas très significatif car il correspond au quadruplet du *Double – wNAF* pour  $|\mathcal{D}| = 4$ , c'est un cas très particulier.

Ensuite, j'ai remarqué qu'à l'inverse des coefficients du niveau 2, il manque toujours un élément dans l'ensemble  $\{\bar{1}, \pm\bar{3}, \pm\bar{5}, \pm\bar{7}\}$ , tous sont susceptibles d'y être absents sauf  $\bar{1}$  évidemment.

De par le constat précédent, on peut conclure que nécessairement deux des quatre coefficients ont la même valeur modulo 16 (au signe près).

Ces conclusions m'induisent sur la piste suivante :

Il suffit de choisir deux nombres parmi  $\pm\bar{3}$ ,  $\pm\bar{5}$  et  $\pm\bar{7}$ ,

pour choisir le dernier coefficient, il suffit de prendre un nombre ayant la même valeur que l'un des trois coefficients précédents modulo 16 (au signe près).

Ainsi, pour résumer, il suffit de choisir un intrus parmi 3, 5 et 7, on applique les mêmes règles que précédemment pour les deux premiers coefficients (les deux restants après avoir éliminer l'intrus), puis finalement on fait  $16 + \mathcal{D}[i]$  ou  $16 - \mathcal{D}[i]$ , où  $i = 0, 1$  ou  $2$ , pour obtenir le dernier coefficient.

Par cette technique, on obtient les coefficients de niveau 3, ce qui fait  $4 \times 4 \times 6 \times 3 = 288$  possibilités, dont certaines se répètent (1, 3, 5, 13 et 1, 13, 5, 3 par exemple). Le calcul exact est dans la remarque suivante.

**Remarque 6.** *Tout d'abord il y a trois possibilités pour l'intrus.*

*Pour chacun des deux premiers coefficients à choisir, il y a quatre possibilités (3, 13, 19 et 29 pour 3).*

*Finalement pour le dernier coefficient, il y a 6 possibilités ( $16 - 1$ ,  $16 + 1$ ,  $16 - \mathcal{D}[1]$ ,  $16 + \mathcal{D}[1]$ ,  $16 - \mathcal{D}[2]$ ,  $16 + \mathcal{D}[2]$ ).*

*D'où ce résultat de  $4 \times 4 \times 6 \times 3 = 288$ , cependant il y a des répétitions !*

*L'exemple donné (1, 3, 5, 13 et 1, 13, 5, 3) est significatif, cela se produit pour la majorité des quadruplets, le seul cas où il n'y a pas répétition, c'est lorsque  $\mathcal{D}[2] = 16 + 1$  ou  $16 - 1$ . En*



effet, dans ce cas la répétition est impossible, dans tous les autres cas les quadruplets sont en double.

Donc le calcul exact est :  $288 - \frac{288-4 \times 4 \times 2 \times 3}{2} = 192$ , le dernier quadruplet est évidemment 1, 3, 5, 7.

**Remarque 7.** Tous les quadruplets ne donnent pas forcément les mêmes résultats, certains sont proche de 2850, d'autres atteignent à peine les 2800, parfois même un petit peu inférieurs, mais ils ont tous ce lien arithmétique en commun.

#### Level 4 : changement minimum pour un résultat bien différent

Le niveau 4 a l'avantage d'être extrêmement proche du niveau précédent.

Pour obtenir les quadruplets du niveau 4, il suffit d'appliquer la même méthode que le niveau 3 en modifiant une petite partie.

Tout d'abord, on choisit l'intrus, puis on choisit les deux premiers coefficients.

Le changement est dans la dernière étape, au lieu de choisir le dernier coefficient parmi  $16 - d$  et  $16 + d$ , il suffit cette fois de choisir parmi  $32 - d$  où  $d$  est l'un des trois coefficients précédents.

Ce qui donne donc exactement  $\frac{192}{2} = 96$  possibilités.

#### Level 5 : dernier casse-tête avant la fin

Le dernier niveau à décortiquer est le niveau 5, en observant attentivement les coefficients de  $\mathcal{D}$  modulo 16, j'ai constaté l'absence de  $\pm 7$ , c'est-à-dire qu'il n'y a ni 7, ni 9, ni 23 et ni 25 dans tous les quadruplets.

Le deuxième constat qui m'est apparu est le suivant, tous les quadruplets ont  $\bar{1}$  en commun, et ils ont tous un élément de la forme  $\pm \bar{3}$  (3, 13, 19 et 29) ou  $\pm \bar{5}$  (5, 11, 21 ou 27).

En résumé les quadruplets vérifient cette règle simple : chaque quadruplet possède au moins élément non congru à 1 modulo 16, ou bien cet élément est congru à  $\pm \bar{3}$ , ou bien il est congru à  $\pm \bar{5}$ . Si cet élément est congru à  $\pm \bar{3}$ , alors les deux éléments restants sont congrus à  $\pm \bar{1}$  ou à  $\pm \bar{3}$ , sinon les deux éléments restants sont congrus à  $\pm \bar{1}$  ou à  $\pm \bar{5}$ .

**Remarque 8.** Pour compter le nombre des quadruplets de niveau 5, il suffit de distinguer trois cas simples :

Cas 1 : Il n'y a qu'un seul des coefficients qui est congru à  $\pm 3$  (ou  $\pm 5$ ).

Dans ce cas, il est aisé de constater qu'il y a 4 possibilités pour le coefficient non congru à 1.

Pour les deux coefficients, il choisit de choisir parmi ces trois possibilités : 15, 17 et 31 ( $\pm \bar{1}$ ).

Le choix des derniers coefficients offre 2 parmi 3 ( $= 3$ ) quadruplets possibles.

Le cas 1 regroupe donc  $2 \times 4 \times 3 = 24$  quadruplets possibles.

Cas 2 : Tous les coefficients sont congrus à  $\pm 3$  (ou  $\pm 5$ ).

Dans ce cas, le calcul est simple, le choix des 3 coefficients se fait parmi les 4 possibilités suivantes : 3, 13, 19 et 29.

Le cas 2 dénombre  $2 \times \binom{4}{3} = 8$ .

*Cas 3 : Il y a deux coefficients congrus à  $\pm 3$  (ou  $\pm 5$ ).*

*Dans ce cas, il y a donc  $\binom{4}{2} = 6$  possibilités pour les deux premiers coefficients.*

*Et pour le dernier coefficient, il faut choisir parmi 15, 17 et 31.*

*Le dernier cas offre donc  $2 \times 6 \times 3 = 36$  quadruplets supplémentaires.*

*On obtient au total  $24 + 8 + 36 = 68$  choix potentiels.*

*Statistiquement, j'obtiens exactement le même résultat, ce qui confirme le lien entre les quadruplets.*

## **6.3 Généralisation et Théorie**

Pour réaliser l'étude précédente, j'ai été forcé de fixer certains paramètres. C'est pourquoi il faut désormais étendre cette étude afin de pouvoir appliquer des niveaux de performance et de sécurité lorsque les paramètres sont différents.

Pour cela, je me suis attelé à la compréhension de tous ces résultats, et ainsi de saisir la théorie sous-jacente aux liens entre les performances et les choix de  $\mathcal{D}$ .

### **6.3.1 Une réalité arithmétique**

— 7 —

## Conclusion

Some text...



# Bibliographie

- [1] J. Toto. The title. In *Proceedings of DummyConf'12*, Paris, 2012.