

www.thalesgroup.com

Familles de courbes hyperelliptiques de genre 2 calcul de l'ordre de la jacobienne et constructions pour les couplages

Aurore Guillevic et Damien Vergnaud

SCREAI



Plan

- 1 Introduction
- 2 Calcul explicite de l'ordre de la jacobienne
- 3 Constructions pour les couplages
- 4 Conclusion

Plan

- 1 Introduction
- 2 Calcul explicite de l'ordre de la jacobienne
- 3 Constructions pour les couplages
- 4 Conclusion

Cryptographie à clé publique

Dans un groupe cyclique \mathbb{G} d'ordre $n = \prod r_i^{e_i}$, r_i premier

- ◆ Probleme du log discret difficile
- ◆ Attaque generique de Pohlig-Hellman en $O(\sum e_i(\log n + \sqrt{r_i}))$
 - $O(\sqrt{r})$ avec $r = \max(r_i)$
- ◆ Si $\mathbb{G} = \mathbb{F}_p^*$, attaque par calcul d'indice
 - $n = p - 1$ de taille comparable aux tailles RSA
- ◆ Si G est une jacobienne de courbe de genre $g > 2$, attaque en $O(q^{2-2/g})$
 - $g = 1$ ou 2

Cryptographie à clé publique

Instanciations :

- ◆ 1977, Diffie-Hellman : groupe multiplicatif d'un corps fini \mathbb{F}_p^* , $n = p - 1$
 - Attaques generiques : n contient un grand facteur premier r .
 - Attaques sous-exponentielles : n tres grand.
- ◆ 1985, Koblitz, Miller : groupe de points d'une courbe elliptique sur un corps fini
 - A ce jour, attaques sur les courbes de trace 1, supersingulieres, de nies sur \mathbb{F}_{2^m} , \mathbb{F}_{3^m} , \mathbb{F}_{p^k} .
- ◆ 1989, Koblitz : jacobienne de courbes de genre superieur
 - 2000, Gaudry : attaque sous-exponentielle pour les genres a partir de 4.
 - Pour $g \geq 3$, attaque en $O(q^{2-2/g})$

→ La plupart des courbes en genre 1 et 2.

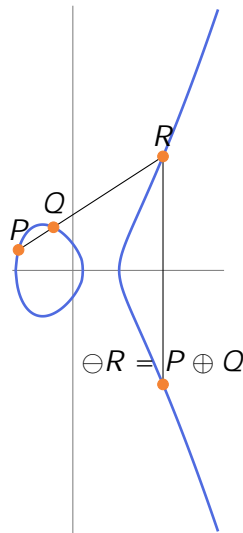
Courbes elliptiques

Formes reduites de Weierstra sur \mathbb{F}_q , $q = p^n$,
 $p \geq 5$, $a, b, c \in \mathbb{F}_q$

$$E(\mathbb{F}_q) = \left\{ (x, y) \in \mathbb{F}_q \times \mathbb{F}_q \text{ verifiant } \begin{cases} y^2 = x^3 + ax + b \end{cases} \right\} \cup \{\mathcal{O}\}$$

est un groupe additif d'element neutre \mathcal{O}
 (note aussi P_∞).

$$P \oplus Q \oplus R = \mathcal{O} \text{ d'ou } P \oplus Q = \ominus R$$



Construction d'une courbe

$$E(\mathbb{F}_q) : y^2 = x^3 + ax + b, \quad 4a^3 + 27b^2 \neq 0$$

Construire un groupe d'ordre r premier sur les points de la courbe.

- ◆ $\#E(\mathbb{F}_q) = q + 1 - t$ avec $|t| \leq 2\sqrt{q} \rightarrow \#E(\mathbb{F}_q) \sim q$
- ◆ Tirer $a, b \in \mathbb{F}_q$, calculer la trace t avec SEA (Schoof-Elkies-Atkin)
 - Vérifier que $t \not\equiv 0 \pmod{p}$ avec $q = p^n$ (courbe supersingulière, attaque avec un couplage)
 - vérifier que $t \not\equiv 1 \pmod{p}$ (courbe anormale)
- ◆ Calculer $\#E(\mathbb{F}_q) = q + 1 - t$,
- ◆ Jusqu'à ce qu'il soit rugueux, i.e. quasiment premier ($r \cdot h$ avec r premier et h très petit).

Cryptographie avec couplage

$$\begin{aligned} \text{Pairing : } \mathbb{G}_1 \times \mathbb{G}_2 &\rightarrow \mathbb{G}_T \\ (P_1, P_2) &\mapsto e(P_1, P_2) \end{aligned}$$

- bilineaire
- non degenerate
- calculable efficacement

- ◆ Chiement basé sur l'identité
- ◆ Diffusion chiffrée
- ◆ Signatures courtes
- ◆ Tracage de traçages
- ◆ Proxy re-encryption

Instanciation

- ◆ couplages de Weil ou Tate et leurs variantes
- ◆ sur des courbes elliptiques appropriées

Instanciation d'un couplage sur une courbe

$$\begin{aligned} \text{Pairing : } \mathbb{G}_1 \times \mathbb{G}_2 &\rightarrow \mathbb{G}_T \\ (P_1, P_2) &\mapsto e(P_1, P_2) \end{aligned}$$

- ◆ $\mathbb{G}_1, \mathbb{G}_2$ sous-groupes distincts d'ordre r
- ◆ r^2 points d'ordre r sur la courbe elliptique: $\#E[r] = r^2$
- ◆ $\mathbb{G}_1 \subset E(\mathbb{F}_q), \mathbb{G}_2 \not\subset E(\mathbb{F}_q)$ ($r \mid \#E(\mathbb{F}_q), r^2 \nmid \#E(\mathbb{F}_q)$)
- ◆ soit k le plus petit entier tel que $r \mid q^k - 1$
 - $\mathbb{G}_1 \subset E(\mathbb{F}_q)$: la 1re dim de $E[r]$ est sur \mathbb{F}_q
 - $\mathbb{G}_2 \subset E(\mathbb{F}_{q^k})$: la 2e dim de $E[r]$ est sur \mathbb{F}_{q^k}
 - $\mathbb{G}_T \subset \mathbb{F}_{q^k}^*$

Considérations de sécurité

Niveau de sécurité par rapport à un calcul de log discret :

- ◆ Sur le sous-groupe d'ordre r premier de $E(\mathbb{F}_p)$:
 - Attaque générique en $O(\sqrt{r})$
 - Pour n bits de sécurité, prendre $\log_2 r = 2n$
- ◆ Sur $\mathbb{F}_{p^k}^*$:
 - Attaques sous-exponentielles
 $O(\exp(1.923(\log N)^{1/3}(\log \log N)^{2/3}))$ avec $N = p^k - 1$
 - Considéré comme équivalent à une taille RSA

Recommandations NIST 2007

Niveau de sécurité (bits)	Taille $\log_2 r$ du sous-groupe de $E(\mathbb{F}_p)$	Taille de $\mathbb{F}_{p^k}^*$ $k \log p$
112	224 { 255	2048
128	256 { 383	3072
256	512 +	15360

j -invariant, isomorphisme et isogénie

j -invariant

$$j_E = 1728 \frac{4a^3}{4a^3 + 27b^2}$$

Théorème

- ◆ $E(\mathbb{F}_q)$ et $E^\theta(\mathbb{F}_q)$ sont isomorphes \Rightarrow elles ont le même j -invariant.
- ◆ $E(\mathbb{F}_q)$ et $E^\theta(\mathbb{F}_q)$ ont le même j -invariant \Rightarrow elles sont isomorphes sur $\overline{\mathbb{F}_q}$.
 - $p \geq 5$, $q = p^n$: sur $\mathbb{F}_q, \mathbb{F}_{q^2}, \mathbb{F}_{q^4}, \mathbb{F}_{q^3}$ ou \mathbb{F}_{q^6} .
 - $E^\theta(\mathbb{F}_q)$: $y^2 = x^3 + a\omega^4x + b\omega^6$, $(x, y) \mapsto (\omega^2x, \omega^3y)$

j -invariant, isomorphisme et isogénie

Isogénie

une isogénie entre deux courbes est un morphisme de courbes (qui preserve l'élément neutre de la loi de groupe).

Exemple : doublement d'un point, Frobenius $(x, y) \mapsto (x^p, y^p)$.

Théorème

E et E^0 ont même nombre de points sur $\mathbb{F}_q \Leftrightarrow$ elles sont isogènes sur \mathbb{F}_q .

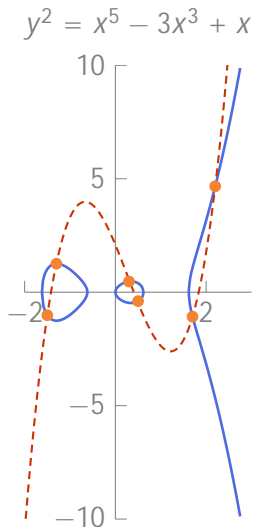
Il existe un morphisme de E vers E^0 et un morphisme (dual) de E^0 vers E de nis sur \mathbb{F}_q qui ne sont a priori pas des isomorphismes et les courbes n'ont a priori pas le même j -invariant.

Jacobienne en genre 2 : loi de groupe

- ◆ On additionne 2 couples de points $(P_1, P_2) \oplus (Q_1, Q_2)$
- ◆ Géométriquement : on trace la cubique qui passe par ces 4 points
- ◆ \rightarrow elle coupe \mathcal{C} en 2 autres points (R_1, R_2) .
- ◆ $(P_1, P_2) \oplus (Q_1, Q_2) \oplus (R_1, R_2) = \mathcal{O}$ d'où

$$(P_1, P_2) \oplus (Q_1, Q_2) = (-R_1, -R_2)$$

La **jacobienne** est notée J_C .



Jacobienne en genre 2 : Comptage de points

$$\begin{aligned} \#J_C(\mathbb{F}_q) &= q^2 + 1 - (1 + q)a_q + b_q \\ &\sim q^2 \end{aligned}$$

- ◆ Pour avoir un groupe d'ordre $\#J_C(\mathbb{F}_q)$ de 256 bits : prendre $\log q \approx 128$
- ◆ Coordonnées (x, y) d'un point de taille deux fois plus petite
- ◆ Mais on calcule avec des couples de points :
 - Même coût en bande passante que pour les courbes elliptiques

Points limitants :

- ◆ Pas encore d'algorithme aussi efficace que SEA pour calculer l'ordre de la jacobienne [*GaudryKohelSmith11*], [*GaudrySchost11*]
- ◆ Arithmétique très complexe sur la jacobienne

Jacobienne en genre 2

→ on va étudier deux cas particuliers :

$$C_5(\mathbb{F}_q) : Y^2 = X^5 + aX^3 + bX, \text{ avec } a, b \neq 0 \in \mathbb{F}_q$$

$$C_6(\mathbb{F}_q) : Y^2 = X^6 + aX^3 + b, \text{ avec } a, b \neq 0 \in \mathbb{F}_q$$

d'après [Satoh09] et [FreemanSatoh11],

- ◆ puis construire une extension de \mathbb{F}_q où la jacobienne se sépare en deux courbes elliptiques;
- ◆ compter le nombre de points de chaque courbe;
- ◆ en déduire le nombre de points de la jacobienne sur l'extension;
- ◆ redescendre au nombre de points de la jacobienne sur \mathbb{F}_q .

Plan

- 1 Introduction
- 2 Calcul explicite de l'ordre de la jacobienne
- 3 Constructions pour les couplages
- 4 Conclusion

Décomposition en deux courbes elliptiques

$$C_5(\mathbb{F}_q) : Y^2 = X^5 + aX^3 + bX, \text{ avec } a, b \neq 0 \in \mathbb{F}_q$$

L'isogenie est a coefficients en \sqrt{b} et $\sqrt[4]{b}$.

Si $\sqrt{b}, \sqrt[4]{b} \in \mathbb{F}_q$: immediat

$$J_{C_5}(\mathbb{F}_q) \xleftrightarrow{\text{isogenie}} E_1(\mathbb{F}_q) \times E_2(\mathbb{F}_q)$$

$$E_1(\mathbb{F}_q) : Y^2 = \delta(X - 1)(X^2 - \gamma X + 1)$$

$$E_2(\mathbb{F}_q) : Y^2 = -\delta(X - 1)(X^2 - \gamma X + 1)$$

Décomposition en deux courbes elliptiques

$$C_5(\mathbb{F}_q) : Y^2 = X^5 + aX^3 + bX, \text{ avec } a, b \neq 0 \in \mathbb{F}_q$$

L'isogenie est a coefficients en \sqrt{b} et $\sqrt[4]{b}$.

Si $\sqrt{b}, \sqrt[4]{b} \in \mathbb{F}_{q^2}$, il faut redescendre sur \mathbb{F}_q

$$\begin{array}{ccc}
 J_{C_5}(\mathbb{F}_{q^2}) & \xleftrightarrow{\text{isogenie}} & E_1(\mathbb{F}_{q^2}) \times E_2(\mathbb{F}_{q^2}) \\
 \downarrow & & \\
 J_{C_5}(\mathbb{F}_q) & &
 \end{array}$$

$$E_1(\mathbb{F}_{q^2}) : Y^2 = \delta(X - 1)(X^2 - \gamma X + 1)$$

$$E_2(\mathbb{F}_{q^2}) : Y^2 = -\delta(X - 1)(X^2 - \gamma X + 1)$$

Décomposition en deux courbes elliptiques

$$C_5(\mathbb{F}_q) : Y^2 = X^5 + aX^3 + bX, \text{ avec } a, b \neq 0 \in \mathbb{F}_q$$

L'isogenie est a coefficients en \sqrt{b} et $\sqrt[4]{b}$.

Si $\sqrt{b}, \sqrt[4]{b} \in \mathbb{F}_{q^4}$, il faut redescendre sur \mathbb{F}_q en deux etapes

$$\begin{array}{ccc}
 J_{C_5}(\mathbb{F}_{q^4}) & \xleftrightarrow{\text{isogenie}} & E_1(\mathbb{F}_{q^4}) \times E_2(\mathbb{F}_{q^4}) \\
 \downarrow & & \\
 J_{C_5}(\mathbb{F}_{q^2}) & & \\
 \downarrow & & \\
 J_{C_5}(\mathbb{F}_q) & &
 \end{array}$$

$$E_1(\mathbb{F}_{q^4}) : Y^2 = \delta(X-1)(X^2 - \gamma X + 1)$$

$$E_2(\mathbb{F}_{q^4}) : Y^2 = -\delta(X-1)(X^2 - \gamma X + 1)$$

Fonction Zêta

$$\begin{aligned} \# J_{C_5}(\mathbb{F}_{q^2}) &= q^4 + 1 - (1 + q^2)a_2 + b_2 \\ \# J_{C_5}(\mathbb{F}_q) &= q^2 + 1 - (1 + q)a_1 + b_1 \end{aligned}$$

Le calcul explicite est fait en passant par les fonctions zêta. On obtient un système facile à résoudre

$$\begin{cases} a_2 &= (a_1)^2 - 2b_1 \\ b_2 &= (b_1)^2 - 4qb_1 + 2q^2 - 2qa_2 \end{cases}$$

On déduit les coefficients a_2, b_2 en fonction de la trace d'une courbe elliptique grâce à l'isogénie.

- ◆ si l'isogénie est définie sur \mathbb{F}_{q^2} , $(a_2, b_2) = (2t_2, (t_2)^2 + 2q^2)$ avec t_2 la trace de E_1 et E_2 sur (\mathbb{F}_{q^2}) .

Fonction Zêta

$$\begin{cases} (a_1)^2 - 2b_1 - 2t_2 = 0 & (2) \\ (b_1)^2 - 4qb_1 - 4qt_2 - (t_2)^2 = 0 & (1) \end{cases}$$

$$(1) \quad b_1 = 4q + t_2, \quad a_1 = \pm 2\sqrt{2q + t_2}$$

$$(2) \quad b_1 = -t_2, \quad a_1 = 0$$

- ◆ si $2q + t_2$ n'est pas un carre, $b_1 = -t_2$, $a_1 = 0$ et $\#J_{C_5}(\mathbb{F}_q) = q^2 + 1 - t_2$.
- ◆ cas special : si $2q + t_2 = y^2$, il y a deux solutions supplementaires (details dans l'article).

Résultats

$$C_5(\mathbb{F}_q) : Y^2 = X^5 + aX^3 + bX \text{ avec } a, b \neq 0 \in \mathbb{F}_q$$

$$E_1, E_2(\mathbb{F}_q[\sqrt[4]{b}]) : Y^2 = \pm\delta(X-1)(X^2 - \gamma X + 1)$$

$$E_1^0, E_2^0(\mathbb{F}_q[\sqrt{b}]) : Y^2 = \pm(X-1)(X^2 - \gamma X + 1)$$

Nombre de points de la jacobienne de $C_5(\mathbb{F}_q)$

1. Isogenie sur \mathbb{F}_q : $\#J_{C_5}(\mathbb{F}_q) = (q+1-t_1)(q+1 \pm t_1)$.
2. Isogenie sur \mathbb{F}_{q^2} , $\sqrt{b} \notin \mathbb{F}_q$: $\#J_{C_5}(\mathbb{F}_q) = q^2 + 1 - t_2$.
3. Isogenie sur \mathbb{F}_{q^2} , $\sqrt{b} \in \mathbb{F}_q$: $\#J_{C_5}(\mathbb{F}_q) = q^2 + 1 - 2q + (t_1^0)^2$.
4. Isogenie sur \mathbb{F}_{q^4} : $\#J_{C_5}(\mathbb{F}_q) = q^2 + 1 - 2n(q+1) + 2n^2$, avec $n \in \mathbb{Z}$ t.q. $2q \pm t_2^0 = 2n^2$.
5. + cas speciaux detaillés dans l'article.

Courbe C_5 , exemple

- ◆ p premier, $p \equiv 1 \pmod{4}$
- ◆ On cherche une courbe $C_5(\mathbb{F}_p) : Y^2 = X^5 + aX^3 + bX$ dont la jacobienne admet un grand sous-groupe d'ordre r premier
 $\#J_{C_5}(\mathbb{F}_p) = rh = p^2 + 1 - 2n(p + 1) + 2n^2$ avec $2p - t_2 = 2n^2$.
- ◆ Tant que l'ordre trouve n'est pas satisfaisant :
 1. On tire $a \in \mathbb{F}_p$, $b \in \mathbb{F}_p$ non carre;
 2. soit $\gamma = \frac{2a - 12\sqrt{b}}{a + 2\sqrt{b}}$, on construit
 $E_1^0(\mathbb{F}_{p^2}) : Y^2 = (X - 1)(X^2 - \gamma X + 1)$ et on calcule sa trace t_2^0 avec SEA;
 3. il existe $n \in \mathbb{Z}$ tel que $2p \pm t_2^0 = 2n^2$, puis on calcule
 $\#J_{C_5}(\mathbb{F}_p) = p^2 + 1 - 2n(p + 1) + 2n^2$

Courbe C_5 , exemple

$p = 0x84c4f7a6b9aee8c6b46b34fa2a2bae69 = 1 \pmod{8}$.

Le 17e essai donne $b = -38$,

$t_2^0 = 0x702461acf6a929e295786868f846ab40 = 0 \pmod{2}$,

$b_1 = 2p - t_2^0 = 2n^2$ comme prévu avec

$n = -0x8c1fc81b9542ce23$.

On trouve $\#J_{C_5}(\mathbb{F}_p) = 2^5 r$ avec r premier de 250 bits, pour une taille cryptographique proche de 128 bits de securite.

$r = 0x226ddb780b2ded62d1d70138d9c7361794679a609fbe5ae85918c88f5b6ea7d$.

Courbe C_6

$$C_6(\mathbb{F}_q) : Y^2 = X^6 + aX^3 + b, \text{ avec } a, b \neq 0 \in \mathbb{F}_q$$

Soit $c = a/\sqrt{b}$ tel que $c \neq \pm 2$.

$$\begin{array}{ccccc}
 J_{C_6}(\mathbb{F}_q[\sqrt[6]{b}]) & \xleftrightarrow{\text{isogenie}} & J_{C_6^\theta}(\mathbb{F}_q[\sqrt[6]{b}]) & & \\
 | & & | & & \\
 J_{C_6}(\mathbb{F}_q[\sqrt{b}]) & & J_{C_6^\theta}(\mathbb{F}_q[\sqrt{b}]) & \xleftrightarrow{\text{isogenie}} & E_c(\mathbb{F}_q[\sqrt{b}]) \times E_{-c}(\mathbb{F}_q[\sqrt{b}]) \\
 | & & & & \\
 J_{C_6}(\mathbb{F}_q) & & & &
 \end{array}$$

$$E_c^{\text{red}}(\mathbb{F}_q[\sqrt{b}]) : Y^2 = X^3 + 3(2c - 5)X + c^2 - 14c + 22$$

$$E_{-c}^{\text{red}}(\mathbb{F}_q[\sqrt{b}]) : Y^2 = X^3 - 3(2c + 5)X + c^2 + 14c + 22$$

Courbe C_6 , Résultats

$$C_6(\mathbb{F}_q) : Y^2 = X^6 + aX^3 + b, \text{ avec } a, b \neq 0 \in \mathbb{F}_q$$

$$E_{\pm c}^{\text{red}}(\mathbb{F}_q[\sqrt{b}]) : Y^2 = X^3 + 3(\pm 2c - 5)X + c^2 \mp 14c + 22,$$

$$c = a/\sqrt{b}$$

Nombre de points de la jacobienne de $C_6(\mathbb{F}_q)$

1. Isogenie sur \mathbb{F}_q : $\#J_{C_6}(\mathbb{F}_q) = (q + 1 - t_1)(q + 1 \pm t_1)$.
2. Isogenie sur \mathbb{F}_{q^2} : $\#J_{C_6}(\mathbb{F}_q) = q^2 + 1 - t_2$.
3. Isogenie sur \mathbb{F}_{q^3} : $\#J_{C_6}(\mathbb{F}_q) = q^2 - q + 1 + (1 + q + t_1)t_1$.
4. Isogenie sur \mathbb{F}_{q^6} : $\#J_{C_6}(\mathbb{F}_q) = q^2 + q + 1 + (q + 1 + n)3n$,
avec $n \in \mathbb{Z}$ tel que $2q - t_2 = 3n^2$.
5. + cas speciaux detaillés dans l'article.

Plan

- 1 Introduction
- 2 Calcul explicite de l'ordre de la jacobienne
- 3 Constructions pour les couplages
- 4 Conclusion

Cryptographie avec couplage : contraintes

$$\begin{aligned} \#E(\mathbb{F}_p) &= p + 1 - t = h \cdot r \text{ avec } r \text{ premier,} \\ &= (t)^2 - 4p = -Dy^2 \end{aligned}$$

- ◆ k choisi suivant le niveau de securite, $6 \leq k \leq 36$
 - k est le plus petit entier tel que $r \mid p^k - 1$, $k \sim r$ dans le cas general
- ◆ $|t| < 2\sqrt{p}$
- ◆ $= (t)^2 - 4p = -Dy^2$ avec D petit pour que la methode CM aboutisse, $D < 10^9$.
- ◆ r grand, i.e. le cofacteur h petit. $1 \leq \rho = \frac{\log p}{\log r} \leq 2$.

On cherche a construire des courbes tres rares.

Méthode de Cocks-Pinch appliquée à C_5

$$\#J_{C_5}(\mathbb{F}_p) = p^2 + 1 - 2n(p + 1) + 2n^2 \text{ avec } 2p - t_2^0 = 2n^2.$$

$$\text{Soit } (E^0(\mathbb{F}_{p^2})) = (t_2^0)^2 - 4p^2 = -4n^2 Dy^2. \quad p = \frac{2n^2 + 2Dy^2}{4}$$

Input: $D, \log_2 r, k$ (sachant que $\log r \approx \frac{1}{44}$)

Méthode de Cocks-Pinch appliquée à C_5 , fin

4. Avec la méthode CM, calculer le j -invariant d'une courbe elliptique $E^0(\mathbb{F}_{p^2})$ de trace $\pm t_2^0$ avec $\Delta = -4D(ny)^2$.
5. Résoudre $j(E^0) = 2^6 \frac{(3c-10)^3}{(c-2)(c+2)^2}$ dans \mathbb{F}_{p^2} et retenir la solution t.q. $c^2 \in \mathbb{F}_p$.
6. Choisir $a, b \in \mathbb{F}_p$ t.q. $a \neq 0$ et $b = (a/c)^2$ (b est un carré dans \mathbb{F}_{p^2} mais pas dans \mathbb{F}_p).

Return r, p premiers, $a, b \in \mathbb{F}_p$

Pour calculer le j -invariant de la courbe, on a modifié `cm.cpp` de la librairie MIRACL d'après [Konstantinou et al. *J. Crypto* 23, 2010].

Plan

- 1 Introduction
- 2 Calcul explicite de l'ordre de la jacobienne
- 3 Constructions pour les couplages
- 4 Conclusion

- ◆ Comptage de points :
 - améliorations d'une méthode efficace pour deux familles particulières de courbes hyperelliptiques de genre 2.
 - Il faut calculer une trace de courbe elliptique puis choisir entre quelques formules explicites.
- ◆ Constructions pour les couplages :
 - On peut choisir n'importe quel degré de plongement (avant : $4 \mid k$ pour \mathcal{C}_5 et $3 \mid k$ pour \mathcal{C}_6).
 - On trouve toujours les coefficients a, b de la courbe de genre 2 à condition de vérifier quelques congruences sur p, r et la trace de E .
 - le j -invariant de la courbe elliptique peut être dans \mathbb{F}_p ou \mathbb{F}_{p^2} .
 - Variante de Cocks-Pinch : $\rho \approx 4$, variante de Brezing-Weng : $\rho \approx 3$.

Perspectives d'améliorations

- ◆ Lorsque $D = 1$ ou 3 , la Jacobienne se scinde en deux, $\rho = 2$ peut être atteint mais c'est un cas trivial.
- ◆ Autres possibilités lorsque $D = 2$
- ⇒ Restrictions aux scalaires de Weil d'ordre 8 lorsque $D = 1$ ou 2 et d'ordre 12 lorsque $D = 3$
- ◆ $\rho < 2$ semble inatteignable avec ces méthodes
- ◆ MIRACL est devenu un produit commercial de CertiVox Ltd. en novembre 2011 et son principal contributeur Dr Michael Scott chef de CertiVox Labs. Il serait intéressant d'utiliser par exemple la librairie multiprecision développée par Andreas Enge pour le calcul de j -invariant.

Pour plus de détails

<http://eprint.iacr.org/2011/604>
et a paraître dans les actes de Pairing 2012.

`aurore.guillevic@ens.fr`