



**HAL**  
open science

# The rational case in the theory of linear forms in logarithms

Éric Gaudron

► **To cite this version:**

| Éric Gaudron. The rational case in the theory of linear forms in logarithms. 2004. hal-00003000v1

**HAL Id: hal-00003000**

**<https://hal.science/hal-00003000v1>**

Preprint submitted on 5 Oct 2004 (v1), last revised 27 Oct 2008 (v2)

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# ÉTUDE DU CAS RATIONNEL DE LA THÉORIE DES FORMES LINÉAIRES DE LOGARITHMES

ÉRIC GAUDRON

RÉSUMÉ. Dans ce travail, nous établissons des mesures d'indépendance linéaires de logarithmes d'un groupe algébrique commutatif dans le cas rationnel. Plus précisément, soit  $k$  un corps de nombres et  $v_0$  une place quelconque de  $k$ . Soit  $G$  un groupe algébrique commutatif défini sur  $k$  et  $H$  un sous-groupe algébrique connexe de  $G$ , d'algèbre de Lie  $\text{Lie}(H)$ . Soit  $u \in \text{Lie}(G(\mathbf{C}_{v_0}))$  un logarithme d'un point  $p$  de  $G(k)$ . Dans le cas *non-périodique* (le point  $p$  n'est pas de torsion modulo certains sous-groupes de  $G$ ), nous obtenons des minoration de la distance de  $u$  à  $\text{Lie}(H) \otimes_k \mathbf{C}_{v_0}$  qui généralisent en partie les mesures déjà connues dans le cas d'un groupe linéaire. Les principales caractéristiques de ces résultats sont d'une part d'améliorer la dépendance en la hauteur  $\log a$  du point  $p$ , en supprimant une puissance de  $\log \log a$ , et, d'autre part, d'être valides dans un contexte très général. La démonstration utilise le formalisme des tailles de sous-schémas formels au sens de J.-B. Bost en association avec un lemme arithmétique de M. Raynaud. Nous avons également recours à un lemme de Siegel absolu et, lorsque  $v_0$  est ultramétrique, à un lemme d'interpolation de D. Roy.

ABSTRACT. We establish new measures of linear independence of logarithms on commutative algebraic groups in the so-called *rational case*. More precisely, let  $k$  be a number field and  $v_0$  be an arbitrary place of  $k$ . Let  $G$  be a commutative algebraic group defined over  $k$  and  $H$  be a connected algebraic subgroup of  $G$ . Denote by  $\text{Lie}(H)$  its Lie algebra at the origin. Let  $u \in \text{Lie}(G(\mathbf{C}_{v_0}))$  a logarithm of a point  $p \in G(k)$ . Assuming (essentially) that  $p$  is not a torsion point modulo proper connected algebraic subgroups of  $G$ , we obtain lower bounds for the distance from  $u$  to  $\text{Lie}(H) \otimes_k \mathbf{C}_{v_0}$ . For the most part, they generalize the measures already known when  $G$  is a linear group. The main feature of these results is to provide a better dependence in the height  $\log a$  of  $p$ , removing a polynomial term in  $\log \log a$ . The proof relies on sharp estimates of sizes of formal subschemes associated to  $H$  (in the sense of J.-B. Bost) obtained from a lemma by M. Raynaud as well as an absolute Siegel lemma and, in the ultrametric case, a recent interpolation lemma by D. Roy.

---

MSC 2000: 11J86 (11J61, 11J13)

**Mots clefs:** formes linéaires de logarithmes, cas rationnel, méthode de Baker, groupe algébrique commutatif, taille de sous-schéma formel, lemme d'interpolation  $p$ -adique, lemme de Siegel absolu.

*Date:* 30 septembre 2004.

## NOTATIONS ET CONVENTIONS

Soit  $g$  un entier naturel  $\geq 1$ . Pour  $\mathbf{t} = (t_1, \dots, t_g) \in \mathbf{N}^g$ , on désigne par  $|\mathbf{t}|$  la longueur  $t_1 + \dots + t_g$  de  $\mathbf{t}$ , et, si  $\mathbf{X} = (X_1, \dots, X_g)$  est un  $g$ -uplet de variables (ou d'objets mathématiques plus généraux, tels des opérateurs différentiels), on note  $\mathbf{X}^{\mathbf{t}} = X_1^{t_1} \cdots X_g^{t_g}$ . Si  $x$  un nombre réel, on note  $\log^+(x) = \log \max\{1, x\}$  et  $[x]$  la partie entière de  $x$ .

Si  $G$  est un schéma en groupes sur un corps commutatif,  $t_G$  ou  $\text{Lie}(G)$  désigne son espace tangent à l'origine. Si  $E$  est un espace vectoriel,  $\mathbf{S}(E)$  (*resp.*  $S^g(E)$ ) est l'algèbre symétrique de  $E$  (*resp.* la composante de degré  $g$  de  $\mathbf{S}(E)$ ) et  $\mathbf{P}(E)$  désigne le schéma projectif  $\text{Proj } \mathbf{S}(E)$ .

Lorsque  $k$  est un corps commutatif, on note  $\bar{k}$  une clôture algébrique de  $k$ . Soit dorénavant  $k$  un corps de nombres, d'anneau des entiers  $\mathcal{O}_k$ , et  $v$  une place de  $k$ .

*Normes et valeurs absolues.*

- Soit  $v$  une place ultramétrique de  $k$ , qui correspond à un idéal premier  $\mathfrak{p}$  de  $\mathcal{O}_k$ , et  $p$  le nombre premier qui engendre l'idéal  $\mathfrak{p} \cap \mathbf{Z}$ . On note  $k_v$  (*resp.*  $\mathcal{O}_v$ ) le complété  $\mathfrak{p}$ -adique de  $k$  en  $\mathfrak{p}$  (*resp.* son anneau de valuation). On munit  $k_v$  de l'unique valeur absolue  $|\cdot|_v$  qui vérifie  $|p|_v = p^{-1}$ . Cette valeur absolue s'étend (de manière unique) à  $\bar{k}_v$  et, en particulier, aux extensions finies de  $k_v$ . Soit  $\mathbf{C}_v = \mathbf{C}_p$  le complété du corps valué  $(\bar{k}_v, |\cdot|_v)$ . Si  $E_v$  est un  $\mathbf{C}_v$ -espace vectoriel de dimension  $g$ , alors toute base  $(e_1, \dots, e_g)$  de  $E_v$  définit une norme  $v$ -adique  $\|\cdot\|_v$  sur  $E_v$  par

$$\left\| \sum_{i=1}^g x_i e_i \right\|_v := \max_{1 \leq i \leq g} \{|x_i|_v\}.$$

Ainsi, lorsque  $E_v = \mathbf{C}_v^g$  muni de sa base canonique, on note  $\|\mathcal{F}\|_v$  ou  $|\mathcal{F}|_v$  la norme d'un vecteur  $\mathcal{F} = (f_1, \dots, f_g) \in \mathbf{C}_v^g$ :

$$\|\mathcal{F}\|_v = |\mathcal{F}|_v = \max_{1 \leq i \leq g} \{|f_i|_v\}.$$

- Soit  $v$  une place archimédienne de  $k$ . On munit  $\mathbf{C}_v = \mathbf{C}$  de la valeur absolue usuelle. Si  $\mathcal{F} = (f_1, \dots, f_g) \in \mathbf{C}^g$ , on note

$$|\mathcal{F}|_v := \max_{1 \leq i \leq g} \{|f_i|_v\} \quad \text{et} \quad \|\mathcal{F}\|_v := \left( \sum_{i=1}^g |f_i|^2 \right)^{1/2}.$$

Avec ces conventions, la formule du produit s'écrit,  $\forall \alpha \in k \setminus \{0\}$ ,  $\prod_v |\alpha|_v^{[k_v : \mathbf{Q}_v]} = 1$  où  $v$  parcourt l'ensemble des places de  $k$  et  $[k_v : \mathbf{Q}_v]$  est le degré local 1, 2 ou  $[k_v : \mathbf{Q}_p]$  selon le caractère réel, complexe ou  $p$ -adique de la place  $v$ .

*Hauteurs.* Soit  $\mathcal{F} \in k^g \setminus \{0\}$ . La hauteur de Weil (logarithmique absolue\*) de  $\mathcal{F}$  est

$$h(\mathcal{F}) = \sum_v \frac{[k_v : \mathbf{Q}_v]}{[k : \mathbf{Q}]} \log |\mathcal{F}|_v.$$

C'est une hauteur projective ( $\forall \alpha \in k \setminus \{0\}$ ,  $h(\alpha\mathcal{F}) = h(\mathcal{F})$ ) et elle se prolonge naturellement aux points de  $\mathbf{P}^{g-1}(k)$ . La hauteur  $L^2$  de  $\mathcal{F}$  est

$$h_{L^2}(\mathcal{F}) = \sum_v \frac{[k_v : \mathbf{Q}_v]}{[k : \mathbf{Q}]} \log \|\mathcal{F}\|_v.$$

On a  $h(\mathcal{F}) \leq h_{L^2}(\mathcal{F}) \leq h(\mathcal{F}) + \frac{1}{2} \log(\#\mathcal{F})$  et l'inégalité de Liouville  $\log |\alpha|_v \geq -[\mathbf{Q}(\alpha) : \mathbf{Q}]h(\{1, \alpha\})$  (pour toute place  $v$  de  $\mathbf{Q}(\alpha)$ ). Soit  $v_1, \dots, v_d$  des vecteurs linéairement indépendants de  $\bar{\mathbf{Q}}^g$  (muni de sa base canonique  $e_1, \dots, e_g$ ). La hauteur de Schmidt de

\*Comme le seront toutes les hauteurs de ce texte.

$(v_1, \dots, v_d)$  est la hauteur  $L^2$  de l'ensemble des coordonnées de Plücker du produit extérieur  $v_1 \wedge \dots \wedge v_d$  dans la base  $e_{i_1} \wedge \dots \wedge e_{i_d}$  ( $1 \leq i_1 < \dots < i_d \leq g$ ). Cette définition ne dépend en réalité que de l'espace vectoriel  $V$  sur  $\overline{\mathbf{Q}}$  engendré par les vecteurs  $v_1, \dots, v_d$  et induit la hauteur de Schmidt  $h(V)$  de  $V$  (et, par convention,  $h(\{0\}) = 0$ ).

## 1. INTRODUCTION

L'objectif de ce travail est d'établir des résultats généraux — archimédiens et ultramétriques — de la *théorie des formes linéaires de logarithmes* dans le cas particulier où le lieu des zéros des formes linéaires est une algèbre de Lie *algébrique*.

Avant d'entrer plus en détail dans la problématique et la signification de cette hypothèse, introduisons quelques données. Soit  $G$  un groupe algébrique commutatif de dimension  $g$  défini sur un corps de nombres  $k$  et  $v_0$  une place (quelconque) de  $k$ . Le groupe de Lie  $G(\mathbf{C}_{v_0})$  possède une application exponentielle  $\exp_{v_0} : \mathcal{T}_{v_0} \rightarrow G(\mathbf{C}_{v_0})$  définie sur un voisinage ouvert  $\mathcal{T}_{v_0}$  de 0 dans l'algèbre de Lie de  $G(\mathbf{C}_{v_0})$  (notée  $\text{Lie } G(\mathbf{C}_{v_0})$  ou  $t_G(\mathbf{C}_{v_0})$  dans la suite). Considérons un élément  $u \neq 0$  de  $\mathcal{T}_{v_0}$  d'exponentielle  $p := \exp_{v_0}(u)$  *k-rationnelle* et donnons-nous par ailleurs une norme  $\|\cdot\|_{v_0}$  sur  $\mathcal{T}_{v_0}$  (de distance associée  $d_{v_0}$ ) ainsi qu'une fonction hauteur  $h \geq 0$  sur  $G(\overline{\mathbf{Q}})$  (provenant par exemple d'une hauteur de Weil sur un espace projectif dans lequel  $G$  se plonge).

La théorie des formes linéaires de logarithmes consiste, dans son aspect quantitatif, à fournir des minoration de la distance  $d_{v_0}(u, V)$  entre  $u$  et une sous- $k$ -algèbre de Lie  $V$  de  $\text{Lie}(G)$ , en fonction des invariants liés aux données introduites (hauteur des quantités algébriques, norme de  $u$ , degré de  $k$ , etc.). Pour qualifier une minoration de  $d_{v_0}(u, V)$ , on parle aussi de *mesure d'indépendance linéaire de logarithmes*. Mais avant même de traiter le cas d'un espace  $V$  général, remarquons que l'hypothèse d'algébricité de  $p$  rigidifie considérablement la situation et empêche notamment le logarithme  $u$  d'être trop petit. De manière plus précise, une conséquence des résultats présentés au § 1.2 est l'existence d'une fonction  $c_1 = c_1(G, k, v_0, \|\cdot\|_{v_0}) \geq 1$ , indépendante de  $p$ , telle que

$$(1) \quad \log \|u\|_{v_0} \geq -c_1 \max\{1, h(p)\}$$

pourvu que le sous-groupe engendré par  $p$  ne rencontre aucun sous-groupe strict de  $G(\overline{k})$ . La caractéristique importante de cette minoration est d'être optimale en la hauteur de  $p$ , comme on peut le voir immédiatement en se plaçant sur le groupe additif  $\mathbb{G}_a$ . De l'inégalité (1) (sur  $G^m$ ), nous déduisons l'existence d'une fonction  $c_2 = c_2(G, n, k, v_0, \|\cdot\|_{v_0}) \geq 1$  telle que, si  $b_1, \dots, b_n$  sont des entiers relatifs non tous nuls et si  $b := \max\{e, |b_1|, \dots, |b_n|\}$ , alors

$$(2) \quad \log \|b_1 u_1 + \dots + b_n u_n\|_{v_0} \geq -c_2 b^2 \max\{1, h(p_1), \dots, h(p_n)\}$$

où  $p_i := \exp_{v_0}(u_i)$  désigne un élément de  $G(k)$  et si le sous-groupe engendré par  $p = (p_1, \dots, p_n)$  ne rencontre aucun sous-groupe strict de  $G^n$ . De la sorte, nous avons fait apparaître  $g$  formes linéaires  $(b_1 z_1^{(j)} + \dots + b_n z_n^{(j)})_{1 \leq j \leq g}$  sur  $\text{Lie}(G^n)$ , et si nous appelons  $V$  la sous-algèbre de Lie de  $\text{Lie}(G^n)$  qu'elles définissent, la norme  $\|b_1 u_1 + \dots + b_n u_n\|_{v_0}$  correspond à la distance entre  $u$  et  $V$  (à une fonction des  $b_i$  près). Notons au passage que les nombres

$b_i$  peuvent tout aussi bien appartenir à l'anneau des endomorphismes de  $G$ , l'élément  $b_1u_1 + \dots + b_nu_n$  étant toujours le logarithme d'un point algébrique de  $G$ . Ce point de vue élémentaire est malheureusement trop naïf et, en dépit d'une excellente dépendance en la hauteur des  $p_i$ , le terme en  $b^2$  est trop mauvais (même s'il peut être remplacé par  $b$  dans le cas d'un groupe linéaire) pour d'éventuelles applications, telles que la résolution d'équations diophantiennes par exemple. En réalité, l'inégalité (2) est une variante sophistiquée de l'inégalité de Liouville, comme nous l'avons déjà expliqué dans [22]. Aujourd'hui, nous savons démontrer l'existence d'une fonction  $c_3 \geq 1$ , qui ne dépend pas de  $b$ , telle que

$$\log d_{v_0}(u, V) \geq -c_3 \log b$$

où, ici,  $\log b$  est un majorant  $\geq 1$  de la hauteur de  $V$  (voir [14, 21]). Et cette borne est optimale. Mais dans cet énoncé, la dépendance en  $h(p)$  ( $p$  étant  $\exp_{v_0}(u)$ , revenons au cas  $n = 1$ ) est de la forme  $h(p)^{g/t+\epsilon}$  où  $t$  est la codimension de  $V$  dans  $\text{Lie}(G)$  et  $\epsilon$  un nombre réel  $> 0$  (le terme  $h(p)^\epsilon$  peut être remplacé par une puissance entière  $> 0$  du logarithme de  $h(p)$ ). Quoi qu'il en soit, lorsque  $V$  est quelconque, c'est-à-dire défini par des équations à coefficients dans  $k$  et pas nécessairement dans  $\text{End}(G)$ , on ne sait pas à l'heure actuelle supprimer cet  $\epsilon$  tout en conservant une dépendance polynomiale en  $\log b$ . En revanche, il est connu depuis le milieu des années quatre-vingt, grâce aux travaux de P. Philippon & M. Waldschmidt [37] d'une part et ceux de G. Wüstholz [51] d'autre part, que si  $G$  est une puissance du groupe multiplicatif  $\mathbb{G}_m$  et si  $V$  est définie par des équations à coefficients *entiers relatifs*, cela est possible (avec de petites restrictions évoquées ci-après). Ils obtiennent une minoration de la forme

$$(3) \quad \log |b_1u_1 + \dots + b_nu_n|_{v_0} \geq -c_4(\log b) \prod_{i=1}^n \max\{1, h(p_i)\}$$

où  $c_4 = c_4(n, k, v_0, (|u_i|)_i)$  et  $b_i \in \mathbf{Z}$ . Dans les articles cités, les énoncés concernent le cas d'une forme linéaire ( $t = 1$ ) et d'une place  $v_0$  archimédienne. Néanmoins, un certain nombre de travaux ultérieurs (citons\*, parmi les résultats récents, ceux de Baker & Wüstholz [3], K. Yu [55], E.M. Matveev [32], M. Waldschmidt [49]) ont permis d'améliorer cette mesure et d'élargir l'étendue de sa validité (en restant dans le cadre d'un groupe linéaire). Par contre, la littérature contient peu d'énoncés avec plusieurs formes linéaires simultanément (*i.e.* avec un espace  $V$  de codimension  $\geq 2$ ), citons [26, 38], mais ces derniers résultats sont des théorèmes très généraux qui ne tiennent pas compte de la spécificité de la situation de Baker, à savoir que les  $b_i$  sont des entiers relatifs. En conséquence, ils contiennent tous un  $\epsilon > 0$ . Toutefois, dans le cas d'un groupe linéaire, la quasi-absence d'énoncé avec  $t \geq 2$  formes linéaires est probablement une anomalie historique et il ne fait guère de doute qu'en adaptant la méthode de Baker l'on puisse démontrer le résultat suivant.

---

\*Vu la grande richesse de la littérature sur ce thème, il serait vain d'essayer d'entrer dans tous les détails sans augmenter de manière exponentielle cette introduction ; le lecteur intéressé pourra se reporter au livre de M. Waldschmidt [49] dont, en particulier, le § 10.4 « The state of the Art » ainsi que les pages 545 à 547 qui retracent les principales étapes de l'histoire du sujet.

**Énoncé 1.1.** Soit  $(b_1^{(j)}, \dots, b_n^{(j)})$ ,  $1 \leq j \leq t$ , des vecteurs de  $\mathbf{Z}^n$  linéairement indépendants. Pour  $1 \leq i \leq n$ , soit  $u_i$  un logarithme de  $p_i \in \overline{\mathbf{Q}} \setminus \{0\}$ . Posons  $\Lambda_j := b_1^{(j)} u_1 + \dots + b_n^{(j)} u_n$  et  $\Lambda := \max_{1 \leq j \leq t} \{|\Lambda_j|_{v_0}\}$ . Alors il existe une fonction  $c_5 = c_5(n, k, v_0, (|u_i|)_i)$  telle que, si  $\Lambda \neq 0$ , on a

$$(4) \quad \log \Lambda \geq -c_5(\log b) \prod_{i=1}^n \max\{1, h(p_i)\}^{1/t}$$

où, dans ce cas,  $\log b$  est un majorant de  $\log \max\{|b_i^{(j)}|, 1 \leq j \leq t, 1 \leq i \leq n\}$ .

En supposant que les  $p_i$  sont *multiplicativement indépendants*, P. Dong a obtenu une telle estimation dans le cadre  $p$ -adique (avec une fonction  $c_5$  entièrement explicite) [17], et, sous cette même hypothèse, nous déduirons cet énoncé des résultats du § 1.2 (avec  $v_0$  quelconque). Notons que l'hypothèse  $b_i^{(j)} \in \mathbf{Z}$  se traduit en termes plus géométriques comme l'existence d'un sous-groupe de  $\mathbb{G}_m^n$  dont l'espace tangent est défini par les équations

$$b_1^{(j)} z_1 + \dots + b_n^{(j)} z_n = 0, \quad 1 \leq j \leq t.$$

De la sorte, la généralisation naturelle de cette hypothèse à un groupe algébrique (commutatif) quelconque consiste à se donner un sous-groupe algébrique  $H$  de  $G$  (de codimension  $t$ ) et à s'intéresser à la distance entre  $u$  et  $V = \text{Lie}(H)$ . Notre article se consacre précisément à l'étude de ce problème, qui porte également l'appellation de *cas rationnel*, afin d'obtenir des équivalents de l'énoncé 1.1 dans un cadre un peu plus général. Dans la perspective décrite précédemment en terme du  $\epsilon$  dans  $h(p)^{g/t+\epsilon}$ , nous obtenons le résultat suivant (qui sera rendu plus précis au § 1.2).

**Énoncé 1.2.** Soit  $G, k, v_0, \|\cdot\|_{v_0}, p, u, V, t$  les données générales introduites ci-dessus. Il existe une fonction  $c_6 = c_6(G, k, v_0, \|u\|_{v_0})$  ayant la propriété suivante. Supposons d'une part que le sous-groupe de  $G$  engendré par  $p$  ne rencontre aucun sous-groupe algébrique strict de  $G$  et, d'autre part, que  $V$  est l'algèbre de Lie d'un sous-groupe algébrique  $H$  de  $G$ , de hauteur  $\leq \log b$  (où  $b$  est un nombre réel  $\geq e$ ). Alors

$$(5) \quad \log d_{v_0}(u, V) \geq -c_6(\log b)^{1+\frac{g+1}{t}} \max\{1, h(p)\}^{g/t}.$$

La disparition de  $\epsilon$  en exposant de la hauteur de  $p$  s'accompagne d'une dépendance polynomiale (non linéaire) en la hauteur du sous-espace  $V$ . Bien qu'il soit extrêmement probable que la minoration (5) reste vraie en supprimant le terme  $(g+1)/t$  dans l'exposant de  $\log b$ , il s'avère que les méthodes employées ici pour démontrer cette inégalité ne sont pas suffisantes pour obtenir cela, hormis, comme nous l'avons vu ci-dessus, dans le cas où  $G$  est une puissance de  $\mathbb{G}_m$ . Signalons cependant que si  $G$  est une puissance d'une courbe elliptique à multiplication complexe, il est possible d'adapter notre preuve pour obtenir un analogue de la mesure (4) (voir [2] pour une place  $v_0$  archimédienne).

**Quelques mots sur la démonstration.** Nous n'allons pas expliquer ici le schéma de la preuve, somme toute assez classique, fondé sur la méthode de Baker revisitée et approfondie par P. Philippon & M. Waldschmidt [36].

La démarche est rappelée au début du § 3. Nous voulons plutôt dégager de façon élémentaire la difficulté technique sur laquelle achoppaient les preuves de l'énoncé 1.1 concernant le passage à un groupe algébrique quelconque. Nous en profiterons également pour mettre en lumière certaines modifications techniques de la preuve, qui la simplifient (dans une certaine mesure), mais au prix, il est vrai, de l'hypothèse sur le point  $p$  déjà rencontrée dans l'énoncé 1.2.

Commençons donc par expliquer l'idée fondamentale du cas rationnel usuel dans  $\mathbb{G}_m^n$  qui conduit à de meilleures mesures d'indépendances linéaires de logarithmes. Pour cela, simplifions la situation au maximum et ne conservons que  $G = \mathbb{G}_m^2$ , la forme linéaire  $z_2 - bz_1$  ( $b \in \mathbf{Z}$ ,  $z_1, z_2$  coordonnées sur  $\text{Lie}(G)$ ) et le point  $p = (\alpha_1, \alpha_2) \in (k \setminus \{0\})^2$  de logarithme  $(u_1, u_2)$ . Autrement dit, nous nous intéressons à la forme linéaire en deux logarithmes  $\Lambda = u_2 - bu_1$ . Les preuves « classiques » qui mènent à une minoration de  $|\Lambda|_{v_0}$  reposent sur l'étude des dérivées (divisées) le long de la droite  $z_2 = bz_1$  d'un certain polynôme exponentiel  $(z_1, z_2) \rightarrow P(e^{z_1}, e^{z_2})$  ( $P \in k[X, Y]$ ) en les points  $s \cdot (u_1, u_2)$ ,  $s \in \mathbf{N}$ . Par translation sur le groupe  $G$ , l'on peut se ramener à  $s = 0$  et le résultat clef qui permet d'exploiter l'hypothèse  $b \in \mathbf{Z}$  est le suivant.

**Fait 1.3.** *Soit  $P \in \mathbf{Z}[X, Y]$  et  $\ell$  un entier naturel. Supposons que l'application  $z \mapsto P(e^z, e^{bz})$ , analytique au voisinage de 0, s'annule à l'ordre  $\ell$  en 0. Alors le nombre*

$$(6) \quad \frac{1}{\ell!} \left( \frac{d}{dz} \right)^\ell P(e^z, e^{bz})|_{z=0}$$

*est un entier relatif.*

Il y a au moins deux preuves assez différentes de ce résultat. La première utilise les polynômes binomiaux

$$(7) \quad \Delta_0(X) := 1, \quad \Delta_n(X) := \frac{X(X+1) \cdots (X+n-1)}{n!} \quad (n \in \mathbf{N} \setminus \{0\})$$

qui prennent des valeurs entières aux points entiers. En considérant un monôme  $X^i Y^j$  qui intervient dans  $P$  (avec le coefficient  $p_{i,j} \in \mathbf{Z}$ ), la dérivée  $\ell^{\text{ème}}$  de  $z \mapsto e^{(i+jb)z}$  en 0 vaut  $(i+jb)^\ell / \ell!$ . On note alors que ce terme est la somme de  $\Delta_\ell(i+jb)$  et d'une combinaison linéaire de  $(i+jb)^h$  avec  $h < \ell$  dont les coefficients ne dépendent que de  $\ell$ . L'hypothèse sur  $P$  se traduit alors par l'égalité entre le coefficient (6) et

$$(8) \quad \sum_{i,j} p_{i,j} \Delta_\ell(i+jb),$$

manifestement un entier, ce qui conclut la preuve. Aussi astucieux soit-il, ce procédé comporte néanmoins une limitation consubstantielle puisque  $b$  ne peut être qu'un entier (ou au pire un nombre rationnel), faute de quoi il est difficile d'envisager une généralisation\*. La seconde preuve du fait 1.3 que nous connaissons est basée sur un changement de variables. On pose  $T =$

---

\*Ceci étant, lorsque l'on effectue la démonstration de la minoration  $|\Lambda|_{v_0}$  de la sorte, il est possible d'affaiblir la condition sur le paramètre  $\log b$  (*grosso modo* en remplaçant  $b$  par  $b / \max\{1, h(\alpha_2)\}$ , voir Theorem 9.1, (ii), de [49]) tout simplement car la valeur (8) de la dérivée peut aussi être utilisée aux places archimédiennes de  $k$ , en lesquelles les polynômes

$e^z - 1$ . Comme  $b \in \mathbf{Z}$ , chacune des fonctions  $e^{(i+jb)z} = (1+T)^{i+jb}$  appartient à l'anneau de séries formelles  $\mathbf{Z}[[T]]$ . Il en est donc de même pour  $P(e^z, e^{bz})$  et l'hypothèse sur  $P$  signifie que le coefficient (6) est également le coefficient de  $T^\ell$  dans ce développement. C'est donc un entier. Contrairement à la démonstration précédente, cette méthode peut être généralisée à un groupe algébrique quelconque. D'ailleurs, rappelons que ce passage de la variable  $z$  (sur  $\text{Lie}(\mathbb{G}_m)$ ) à la variable  $T$  (sur  $\mathbb{G}_m$ ) et ses répercussions arithmétiques constituent la cheville ouvrière des récentes avancées dans le domaine des formes linéaires de logarithmes (voir [14, 21]), mais aussi dans les questions liées à l'algébricité de feuilles formelles [9, 24]. C'est cette observation qui apporte l'essentiel des résultats nouveaux de cet article.

Il me faut signaler cependant qu'une difficulté technique échappe à l'analyse du cas d'un tore telle que nous venons de la faire. Dans le cas général, nous avons besoin de modèles lisses des groupes  $G$  et  $H$  (rappelons que  $V = \text{Lie}(H)$ ) sur des anneaux de la forme  $\mathcal{O}_k[1/m]$ , où  $m$  est un entier  $> 0$ . Si pour le groupe  $G$  cela ne pose aucun problème ( $m$  dépend de  $G$ ), le groupe  $H$ , quant à lui, admet un modèle lisse mais sur un anneau plus « gros »  $\mathcal{O}_k[1/mm']$  où  $m'$  est un entier qui dépend *a priori* de  $H$  (et qui exprime en partie l'information en les places de mauvaises réductions de  $H$ ). Par conséquent, il est important de contrôler l'entier  $m'$  fonction du modèle de  $H$ . Cela revient à avoir des estimations  $p$ -adiques de nombres algébriques plus généraux issus de (6) qui soient les plus précises possible et qui tiennent compte du modèle choisi pour  $H$ . C'est pourquoi nous emploierons un formalisme particulièrement adapté à cet objectif, décrit par J.-B. Bost au § 3.1 de [9]. Le langage géométrique de ce formalisme, qui s'exprime en termes de « tailles de schémas formels lisses », éclaire le rôle exact joué par le choix du modèle de  $H$ . Mais la difficulté technique évoquée ne disparaît pas pour autant dans ce langage. Un théorème\* de M. Raynaud, donnant un condition pour que l'inclusion entre variétés abéliennes se prolonge en une *immersion* pour les modèles de Néron correspondants, permet alors de contrôler très précisément l'entier  $m'$ . Nous détaillerons tout cela au § 3.2.

Cet argument arithmétique crucial s'accompagne d'une double utilisation d'un lemme de Siegel absolu, à la fois pour bâtir le « classique » polynôme auxiliaire requis par la démonstration de transcendance mais aussi pour fixer une  $k$ -base de  $V = \text{Lie}(H)$ , de « petite » hauteur, qui restera la même à chaque étape de la preuve. Ce dernier point évite le recours à certaines bases orthonormées de  $\text{Lie}(G) \otimes_v \mathbf{C}$  et les contrôles de changements de bases subséquents, qui intervenaient auparavant. Quant à construire le polynôme auxiliaire de la sorte, cela procure l'avantage de supprimer la quantité  $Dh(\xi_1, \dots, \xi_D)$ , où  $\xi_1, \dots, \xi_D$  est une  $\mathbf{Q}$ -base de  $k$  (*i.e.*, de manière équivalente, le logarithme du discriminant absolu de  $k$ , cf. [43]), qui apparaissait dans les mesures de [21]. L'emploi d'un lemme de Siegel absolu dans le contexte des formes linéaires de logarithmes nous avait été communiqué par S. David. Il sera utilisé dans la version complète (en cours de rédaction) de [14] et il est sous-jacent aux résultats présentés dans [2]. Il remplace

---

binomiaux croissent plus lentement (en un sens à préciser) que les monômes divisées  $X^\ell/\ell!$  (voir la discussion du § 2.6).

\*Qui nous a été indiqué par J.-B. Bost.



le lemme de Thue-Siegel dont on se servait d'ordinaire. Nous le présentons au § 2.7 et nous l'appliquons aux § 3.1.3 et 3.4. Tous les bienfaits de ce lemme pour la démonstration (à commencer par la clarté même de l'argumentation) sont malheureusement un peu ternis par une difficulté technique que je ne sais pas surmonter sans supposer que le groupe engendré par le point  $p$  ne rencontre aucun sous-groupe strict de  $G(\bar{k})$ , c'est-à-dire, dans un langage plus imagé, que  $p$  est très « général » ou bien que  $G$  est très « petit » (simple)\*. Nous avons déjà été contraint d'émettre ce type d'hypothèses lorsque nous avons mis en œuvre la méthode des pentes, qui elle, pourtant, ne requiert aucun lemme de Siegel (voir [22]). Le point commun aux deux approches est un certain sous-cas, appelé *cas périodique*, que je ne sais pas intégrer dans les preuves, bien qu'il fût déjà résolu de manière très astucieuse par P. Philippon & M. Waldschmidt dans leur article [36], grâce à une extrapolation (à la manière de Gel'fond) sur les dérivations. Sauf erreur, il semble que l'on puisse éviter cette hypothèse sur le point  $p$  lorsque  $G$  est un produit de groupes de dimension 1 tels  $\mathbb{G}_a$ ,  $\mathbb{G}_m$  ou une courbe elliptique (voir la preuve à venir de [2]).

Enfin, nous devons mentionner que l'extrapolation  $p$ -adique n'a été rendue possible que grâce à un résultat récent de D. Roy [41]. En effet, jusqu'à présent et à ma connaissance, le seul lemme d'interpolation  $p$ -adique suffisamment général pour être utilisé dans notre contexte et disponible dans la littérature était dû à P. Robba [40]. D. Bertrand et Yu. Flicker s'en étaient servis dans leur article [6]. Malheureusement, le théorème de P. Robba comporte un terme supplémentaire qui, dans notre cas et avec les notations utilisées dans la suite, se comporte logarithmiquement comme  $TS \log S$  au lieu de  $TS$  attendu. Avec les méthodes employées ici, ce terme parasite aurait exigé une condition de petitesse (fonction du sous-espace<sup>†</sup>) sur le logarithme et aurait anéanti du même coup les améliorations en terme de la hauteur du point  $p$ , évoquées ci-dessus. En le supprimant, D. Roy obtient alors un énoncé (lemme 3.22) très proche de la version complexe « classique » (telle celle due à M. Waldschmidt, cf. lemme 3.18). Ce qui s'accorde avec nos objectifs.

**Remerciements.** Je remercie G. Diaz et G. Rémond pour leurs remarques et commentaires sur une première version de ce texte, qui m'ont permis d'améliorer la présentation générale et de corriger de nombreux détails. Je remercie également J.-B. Bost pour ses éclaircissements à propos du lemme 3.6 et du théorème de M. Raynaud sous-jacent.

**Sommaire.** À la suite de la présentation des principales caractéristiques de nos résultats et de leurs démonstrations, nous introduisons au § 1.1 les données précises grâce auxquelles nous pourrions énoncer au paragraphe suivant les théorèmes que nous obtenons. Nous discuterons alors de quelques-uns de leurs aspects techniques et des applications possibles. Nous resituerons également l'énoncé  $p$ -adique dans son contexte historique. Le § 2 est consacré à la préparation de la preuve qui est commune, pour une large part,

---

\*En réalité, la véritable hypothèse faite aux théorèmes 1.4 et 1.5 est plus faible, mais c'est un détail.

<sup>†</sup>À savoir, avec les notations qui vont suivre,  $\|u\|_{v_0} \ll r_p/\alpha$ .

aux différents théorèmes. Nous y présentons un certain nombre de résultats préliminaires qui se divisent en deux catégories : ceux — assez techniques — qui sont directement reliés à l’environnement de la preuve (§ 2.1 → § 2.5) et ceux à l’éventail d’utilisation plus large (§ 2.6 et § 2.7). Le § 2.6 est une analyse du rôle joué par la droite affine  $\mathbb{G}_a$  qui intervient dans la preuve et le § 2.7 est le lemme de Siegel absolu évoqué ci-dessus. La troisième section concerne la démonstration proprement dite des énoncés du § 1.2 avec, en particulier (§ 3.2), le contrôle arithmétique de certains coefficients de Taylor. Enfin, pour conclure (§ 4), nous examinons brièvement quelques unes des caractéristiques de la preuve en les comparant avec celles d’autres articles récents sur ce thème.

## TABLE DES MATIÈRES

Notations et conventions	2
1. Introduction	3
Quelques mots sur la démonstration	5
Remerciements	8
Sommaire	8
1.1. Données générales	9
1.2. Résultats	12
2. Préparatifs	15
2.1. Mise en place de données supplémentaires	15
2.2. Paramètres et choix d’un sous-groupe	16
2.3. Rang d’un système d’équations linéaires	18
2.4. Remarque auxiliaire (non-nullité du $\max\{D_i\}$ )	20
2.5. Lemme de multiplicités	21
2.6. Poids de la droite affine	23
2.7. Lemme de Siegel absolu	26
3. Démonstrations des théorèmes 1.4 et 1.5	28
3.1. Choix des paramètres	28
3.2. Estimations ultramétriques d’un coefficient de Taylor	31
3.3. Estimations archimédiennes de coefficients de Taylor	38
3.4. Construction du polynôme auxiliaire	39
3.5. Extrapolation	42
3.6. Fin de la démonstration	48
4. Conclusion	48
Références	49

**1.1. Données générales.** Dans ce paragraphe, nous fixons des notations qui seront utilisées tout au long de ce texte. Certains des théorèmes qui vont suivre ne seront valides qu’avec des hypothèses supplémentaires sur les objets introduits ici, hypothèses qui seront alors explicitement mentionnées.

Soit  $n$  un entier naturel  $\geq 1$ ,  $k$  un corps de nombres de degré  $D$  et  $v_0$  une place quelconque (archimédienne ou ultramétrique) de  $k$  qui sera privilégiée par la suite.

Soit  $G_1, \dots, G_n$  des groupes algébriques (connexes) commutatifs définis sur  $k$  et  $g_1, \dots, g_n$  leurs dimensions respectives. Soit  $\Phi_i : G_i \hookrightarrow \mathbf{P}_k^{N_i}$  un plongement de  $G_i$  dans l'espace projectif  $\mathbf{P}_k^{N_i}$ , comme variété quasi-projective. En particulier, les degrés et fonctions de Hilbert-Samuel géométriques considérés dans la suite sont relatifs aux faisceaux  $\mathcal{O}_{G_i}(1)$ ,  $1 \leq i \leq n$ , induits par ces plongements. Nous reviendrons en détails au § 2.1 sur le choix précis de ces plongements mais signalons dès à présent que ces choix simplifient les démonstrations mais n'ont guère d'importance pour énoncer les résultats. Notons  $G$  le groupe  $G_1 \times \dots \times G_n$ ,  $g := g_1 + \dots + g_n$  sa dimension et  $\Phi$  le plongement de  $G$  dans le produit des  $\mathbf{P}_k^{N_i}$  induit par les  $\Phi_i$ .

À partir de l'adhérence de Zariski de  $G_i$  dans  $\mathbf{P}_{\mathcal{O}_k}^{N_i}$ , il est possible de construire un modèle lisse de  $G_i$  au-dessus d'un ouvert de  $\text{Spec}(\mathcal{O}_k)$  (voir [7]), c'est-à-dire un schéma en groupes  $\mathcal{G}_i \rightarrow \text{Spec } \mathcal{O}_k[1/m_i]$  ( $m_i \in \mathbf{N} \setminus \{0\}$ ) lisse et dont la fibre générique  $\mathcal{G}_i \times \text{Spec}(k)$  est (isomorphe à)  $G_i$ . Quitte à restreindre  $\mathcal{G}_i$  à un ouvert plus petit, nous pouvons supposer d'une part que  $m_i$  est le même entier  $m$  pour tous les  $i$  et d'autre part que l'anneau  $\mathcal{O}_k[1/m]$  est principal\*. Soit  $\mathcal{G} \rightarrow \text{Spec } \mathcal{O}_k[1/m]$  le modèle lisse de  $G$  induit par les  $\mathcal{G}_i$ .

Fixons  $v$  une place de  $k$  et  $i \in \{1, \dots, n\}$ . Considérons  $\exp_{i,v}$  une application exponentielle du groupe de Lie  $v$ -adique  $G_i(\mathbf{C}_v)$ , définie sur un voisinage ouvert de 0 dans  $t_{G_i}(\mathbf{C}_v)$ . Lorsque  $v$  est une place archimédienne, il est bien connu que cette application se prolonge en un morphisme analytique à tout l'espace tangent  $t_{G_i}(\mathbf{C}_v)$  et définit ainsi une application  $\exp_{i,v} : t_{G_i}(\mathbf{C}_v) \rightarrow G_i(\mathbf{C}_v)$  surjective. Lorsque  $v$  est ultramétrique, ces propriétés ne sont plus vraies en général. Notons alors dans ce cas  $\mathcal{T}_{i,v}$  un sous-groupe ouvert maximal de  $t_{G_i}(\mathbf{C}_v)$  tel que  $\exp_{i,v}$  réalise un difféomorphisme analytique de  $\mathcal{T}_{i,v}$  sur son image  $\mathcal{U}_{i,v}$  (ouvert de  $G_i(\mathbf{C}_v)$  contenant l'élément neutre). Dans la suite, l'exponentielle  $\exp_{i,v}$  sera l'application restreinte  $\mathcal{T}_{i,v} \rightarrow \mathcal{U}_{i,v}$ . Afin d'uniformiser les notations, nous écrirons encore  $\mathcal{T}_{i,v} = t_{G_i}(\mathbf{C}_v)$  (*resp.*  $\mathcal{U}_{i,v} = G_i(\mathbf{C}_v)$ ) dans le cas archimédien, bien que l'exponentielle « restreinte » ne soit plus alors un difféomorphisme (en général). L'espace tangent à l'origine  $t_{\mathcal{G}}$  de  $\mathcal{G}$  est un  $\mathcal{O}_k[1/m]$ -module libre (car projectif, voir note de bas de page) de rang  $g_i$  et  $t_{\mathcal{G}}$  est également libre de rang  $g$ . Soit  $\mathbf{e} = (e_1, \dots, e_g)$  une base sur  $\mathcal{O}_k[1/m]$  de  $t_{\mathcal{G}}$  obtenue par concaténation de bases des  $t_{G_i}$ ,  $1 \leq i \leq n$ . Quitte à multiplier chacun des  $e_i$  par une puissance suffisamment grande de  $m$ , nous pouvons supposer que, pour toute place ultramétrique  $v$ , le disque ouvert

$$D(0, r_p) = \left\{ \mathbf{z} = z_1 e_1 + \dots + z_g e_g \in t_{\mathcal{G}}(\mathbf{C}_v); \max_{1 \leq j \leq g} |z_j|_v < r_p \right\},$$

où  $r_p := |p|_v^{1/(p-1)}$ , est inclus dans  $\mathcal{T}_v := \mathcal{T}_{1,v} \times \dots \times \mathcal{T}_{n,v}$ . En effet, il existe un entier  $n_0 \geq 1$ , ne dépendant que de  $(\mathcal{G}, m)$ , pour lequel, en toute place  $v$ , le développement en série de l'exponentielle de  $G(\mathbf{C}_v)$  au voisinage de 0 s'écrit

$$\sum_{\mathbf{n} \in \mathbf{N}^g} \frac{a_{\mathbf{n},v}}{\mathbf{n}!} \mathbf{z}^{\mathbf{n}}$$

\*Si bien qu'un  $\mathcal{O}_k[1/m]$ -module projectif (de type fini) est nécessairement libre.

avec  $a_{\mathbf{n},v} \in \mathcal{O}_v[1/m]$ , polynôme en  $1/m$  de degré  $\leq n_0|\mathbf{n}|$ . Aux places  $v \nmid m$ , on a  $a_{\mathbf{n},v} \in \mathcal{O}_v$  et l'on sait que le disque  $D(0, r_p)$  est contenu dans le domaine de convergence strict de cette série. Si  $v \mid m$ , on se ramène au cas précédent en considérant les coordonnées de  $\mathbf{z}$  dans la base  $m^{n_0}\mathbf{e}$  de  $t_G(\mathbf{C}_v)$ .

L'exponentielle  $\exp_v := (\exp_{1,v}, \dots, \exp_{n,v})$  de  $G(\mathbf{C}_v)$  munie de la base  $\mathbf{e}$  est appelée dans la littérature *exponentielle normalisée* (cela fixe un isomorphisme de  $\mathcal{U}_v := \mathcal{U}_{1,v} \times \dots \times \mathcal{U}_{n,v}$  avec un groupe *standard* selon la terminologie de Bourbaki [11], III, § 7, n°3). La base  $\mathbf{e}$  confère également à  $t_G(\mathbf{C}_v)$  une structure d'espace vectoriel normé, par transport de la structure hermitienne ( $v$  archimédienne) ou de la norme du sup ( $v$  ultramétrique) fournie par la base canonique de  $\mathbf{C}_v^g$  (voir § Notations et Conventions). Nous notons  $\|\cdot\|_v$  (*resp.*  $d_v$ ) cette norme sur  $t_G(\mathbf{C}_v)$  (*resp.* la distance associée à cette norme). L'identification  $t_G(k) \simeq k^g$  permet en particulier — si on se donne un sous-espace vectoriel de  $t_G(\mathbf{C}_v)$  — d'écrire la distance entre un point  $x$  de  $t_G(\mathbf{C}_v)$  et cet espace en termes de *formes linéaires* en les coordonnées de  $x$  associées à un système d'équations définissant cet espace.

Considérons un point\*  $p = (p_1, \dots, p_n)$  de  $G(k) \cap \mathcal{U}_{v_0}$  ainsi qu'un logarithme  $u = (u_1, \dots, u_n) \in \mathcal{T}_{v_0}$  de ce point :

$$\exp_{v_0}(u) = p .$$

Soit  $V$  un sous-espace vectoriel de l'espace tangent  $t_G(k)$ , de codimension  $t \geq 1$  (ce qui suit est trivial et dénué d'intérêt lorsque  $t = 0$ , *i.e.*  $V = t_G(k)$ ).

**HYPOTHÈSE : Dans tout ce texte, nous supposons que  $V$  est l'algèbre de Lie d'un sous-groupe algébrique connexe  $H$  de  $G$ .**

En d'autres termes, l'espace  $V$  est une algèbre de Lie *algébrique* au sens de [16] (II, § 6, 2.4, p. 262). Bien que certains des énoncés qui vont suivre puissent être adaptés lorsque cette hypothèse n'est pas vérifiée, nous avons délibérément choisi de nous restreindre à ce cas (dit *rationnel*) d'une part pour des raisons techniques (au début de la preuve, le « conditionnement » des données de départ et le choix des paramètres sont radicalement différents du « cas général », tel qu'il est écrit par exemple dans [21, 25]) et d'autre part pour conserver une certaine unité du texte. Il s'avère par ailleurs que c'est le cas le plus utile dans les applications à d'autres problèmes de théorie des nombres (il suffit de se référer par exemple au survol écrit sur ce thème par Fel'dman & Nesterenko, chap. 4, § 2 de [19], pour s'en convaincre ; voir aussi l'énoncé 1.7 un peu plus loin).

Nous définissons un paramètre  $y \in \{0, 1\}$  par  $y = 0$  si  $G$  est une variété semi-abélienne et  $y = 1$  sinon. Nous avons déjà distingué le cas semi-abélien du cas général dans [21] et nous avons également introduit un tel  $y$  dans [22]. Cependant, dans ce dernier cas, la définition de  $y$  était plus subtile et non équivalente. Nous verrons la raison de cette simplification au tout début de la preuve des énoncés (§ 2.1), lorsque seront mises en place les « véritables » données avec lesquelles nous travaillerons.

**IMPORTANTÉ CONVENTION.** Dans toute la suite, le mot « constante » qualifie un nombre réel  $\geq 1$  qui ne dépend que de  $G, \Phi, \mathcal{G}, m, \mathbf{e}, (d_v)_v$ , c'est-à-dire du groupe algébrique  $G$  et des données satellites autour de  $G$ . Partant, ce

---

\*La lettre  $p$  désigne à la fois ce point et le nombre premier qui divise  $v_0$ . Mais cette maladresse ne devrait pas créer d'ambiguïté.

nombre réel est indépendant de  $k$  (il ne dépend que d'un corps de définition de  $G$ ), de  $p, u, V$  etc. Une telle constante sera systématiquement désignée par la lettre  $c$  munie d'un indice (mais la réciproque est fausse).

**1.2. Résultats.** Les théorèmes que nous allons énoncer ici concernent tous le cas rationnel, comme nous l'avons mentionné dans l'introduction.

Fixons auparavant quelques notations supplémentaires. Pour  $i \in \{1, \dots, n\}$ , le plongement (en tant qu'espace quasi-projectif) de  $G_i$  dans  $\mathbf{P}_k^{N_i}$  fournit une hauteur de Weil  $h$  sur l'ensemble des points  $\overline{\mathbf{Q}}$ -rationnels de  $G_i$  (dont, en particulier,  $p_i$ ). Nous noterons encore  $h$  la hauteur induite sur  $G(\overline{\mathbf{Q}})$ . Soit  $\rho_i$  l'ordre analytique de  $G_i$  défini comme suit :  $\rho_i = 1$  si  $G_i$  est un groupe linéaire et  $\rho_i = 2$  sinon (c'est-à-dire lorsque  $G_i$  a une composante abélienne non triviale).

Dans le cas archimédien, l'énoncé le plus général que nous obtenons est le suivant.

**Théorème 1.4.** *Il existe une constante  $c_7 \geq 1$  ayant la propriété suivante. Supposons que  $v_0$  est une place archimédienne. Soit  $\epsilon$  un nombre réel  $\geq e$  et  $\mathfrak{a}$  un entier naturel supérieur ou égal à  $D \max\{1, h(V)\} / \log \epsilon$ . Notons  $U_0$  le nombre réel*

$$(9) \quad U_0 := (\mathfrak{a} \log \epsilon) \left( \mathfrak{a}^y + \frac{D}{\log \epsilon} \log \left( e + \frac{D}{\log \epsilon} \right) \right)^{1/t} \\ \times \prod_{i=1}^n \left( 1 + \frac{D \max_{0 \leq s \leq c_7 \mathfrak{a}} \{h(sp_i)\} + (\epsilon \mathfrak{a} \|u_i\|_{v_0})^{\rho_i}}{\mathfrak{a} \log \epsilon} \right)^{g_i/t}.$$

Supposons que pour tout entier  $s \in \{1, \dots, c_7 \mathfrak{a}\}$  et tout sous-groupe algébrique connexe  $G'$  de  $G$  vérifiant  $t_{G'} + V \neq t_G$  on ait  $sp \notin G'(\overline{k})$ . Alors  $u \notin V(\mathbf{C})$  et

$$(10) \quad \log d_{v_0}(u, V) \geq -c_7 U_0.$$

Formellement, ce résultat est très proche de celui énoncé avec  $t = 1$  dans le théorème principal de [21]. Hormis la disparition de la hauteur d'une  $\mathbf{Q}$ -base de  $k$  (voir l'introduction), c'est surtout la définition de l'entier  $\mathfrak{a}$  qui change radicalement. Dans l'article en question, cet entier était (en substance)  $\frac{D}{\log \epsilon} \log h(p)$  alors qu'ici il dépend du sous-espace  $V$  mais pas du point  $p$ . Sachant qu'il existe une constante  $c_8$  pour laquelle  $h(sp_i) \leq c_8 \max\{1, s^{\rho_i} h(p_i)\}$  pour tout entier  $s$ , l'on déduit aisément de la définition de  $U_0$  la dépendance standard en  $h(p)$  décrite dans l'introduction (énoncés 1.1 et 1.2). Si  $n = 1$ , nous pouvons regarder la dépendance *minimale* en  $h(p)$  de  $U_0$ , c'est-à-dire choisir  $\epsilon$  (qui est le seul paramètre vraiment « libre » du théorème 1.4) de sorte que  $U_0$ , comme fonction uniquement de  $h(p)$ , soit minimal. Avec des considérations élémentaires, on s'aperçoit que, dans cette optique, le meilleur choix pour  $\epsilon$  est  $e \sqrt{\max\{1, h(p)\}}$ , ce qui conduit à l'estimation

$$(11) \quad \log d_{v_0}(u, V) \geq -c_9 \left( \frac{\max\{1, h(p)\}}{\log \max\{e, h(p)\}} \right)^{g/t}$$

où  $c_9$  est une fonction des données qui ne dépend pas de la hauteur de  $p$ . Si nous comparons cela à la conséquence I.3.3 de [21] (écrite avec  $t = 1$ ), nous constatons à nouveau la disparition d'un logarithme de  $h(p)$  (qui était au numérateur du membre de droite de (11)). Autrement dit, nous vérifions ainsi que l'amélioration en  $h(p)$  est bien une caractéristique intrinsèque de la mesure (10) et non pas le simple effet d'un choix différent de paramètres dans deux énoncés « semblables ». De la même manière, nous observons aussi une amélioration (très légère) en le degré  $D$  avec la suppression d'une puissance d'un logarithme de  $D$ . En choisissant  $\epsilon = \sqrt{D}$ , on a

$$\log d_{v_0}(u, V) \geq -c_{10} \frac{D^{1+(2g+1)/t}}{(\log(1+D))^{2g/t}},$$

où  $c_{10}$  est une fonction qui ne dépend pas de  $D$ . Cela est à comparer à la conséquence I.3.4 de [21] qui, dans le cas où  $t = 1$ , comporte un terme supplémentaire  $(\log(1+D))^{g+1}$  au numérateur du membre de droite. Bien que ce dernier progrès soit — il me semble — assez marginal, il reflète néanmoins la possibilité en se focalisant sur une donnée précise ( $h(p)$ ) d'en affaiblir d'autres, par le jeu des paramètres de la démonstration de transcendance qui brassent plusieurs données à la fois.

Nous avons également une version ultramétrique de l'énoncé 1.4, mais, auparavant, évoquons quelques points d'histoire. Si la littérature est assez riche et variée en analogues  $p$ -adiques de mesures d'indépendance linéaire de logarithmes lorsque  $G$  est un groupe linéaire (en particulier grâce aux travaux de K. Yu [53–55]), elle est en revanche beaucoup plus réduite si  $G$  a une partie abélienne, voire même inexistante lorsque, comme ici,  $G$  est quelconque. L'essor de la théorie ultramétrique des formes linéaires de logarithmes abéliens remonte à la fin des années soixante-dix avec la série d'articles de D. Bertrand [4–6] (la dernière référence est un article en commun avec Yu. Flicker) qui, en s'appuyant sur les travaux (archimédiens) de Baker, Masser, Coates, Lang [12, 30, 31], a développé et établi diverses mesures  $p$ -adiques comparables à celles connues alors dans le cadre de produit de courbes elliptiques ou de variétés abéliennes (souvent, mais pas exclusivement, avec une hypothèse de multiplication complexe). Puis, probablement par suite de difficultés techniques liées à l'absence d'un lemme de multiplicités et d'un lemme d'interpolation ultramétrique adéquats\*, les travaux publiés se sont interrompus jusqu'en 1996, date à laquelle G. Rémond et F. Urfels ont obtenu une mesure en *deux* logarithmes elliptiques  $p$ -adiques (*i.e.*  $G$  est le produit de deux courbes elliptiques) entièrement explicites [39]. Ce dernier résultat, qui peut (selon les auteurs) se généraliser à un produit quelconque de courbes elliptiques, repose sur la méthode des déterminants d'interpolation de M. Laurent [28]. Enfin, signalons que N. Hirata-Kohno a récemment annoncé (2003) une telle généralisation au cas d'un produit quelconque de courbes elliptiques, totalement explicite, qui se présente comme

---

\*Ces obstacles sont maintenant levés grâce aux travaux de P. Philippon [34, 35], G. Wüstholz [52] et D. Roy [41]. Par exemple, les résultats de [21] pourraient être adaptés dans le cas  $p$ -adique.

un analogue (amélioré) du théorème de S. David [13]. Le pendant ultramétrique du théorème 1.4 que nous nous proposons d'établir simultanément est le suivant.

**Théorème 1.5.** *Il existe une constante  $c_{11} \geq 1$  ayant la propriété suivante. Supposons que  $v_0$  est ultramétrique et que  $\|u\|_{v_0} < r_p^2$  (où, rappelons-le,  $r_p = p^{-1/(p-1)}$ ). Considérons un nombre réel  $\mathfrak{r}$  dans l'intervalle ouvert  $]1, r_p^2/\|u\|_{v_0}[$ . Soit  $\mathfrak{a}$  un entier naturel vérifiant*

$$\mathfrak{a} \geq \frac{D \max\{1, h(V)\} + \log^+(\log(\mathfrak{r}))^{-1}}{\log \mathfrak{r}}.$$

Notons  $U_1$  le nombre réel

(12)

$$(\mathfrak{a} \log(1+\mathfrak{r})) \left( \mathfrak{a}^y + \frac{D}{\log \mathfrak{r}} \log \left( e + \frac{D}{\log \mathfrak{r}} \right) \right)^{1/t} \prod_{i=1}^n \left( 1 + \frac{D \max_{0 \leq s \leq c_{11}\mathfrak{a}} \{h(sp_i)\}}{\mathfrak{a} \log \mathfrak{r}} \right)^{g_i/t}.$$

Supposons que pour tout entier  $s \in \{1, \dots, c_{11}\mathfrak{a}\}$  et tout sous-groupe algébrique connexe  $G'$  de  $G$  tel que  $t_{G'} + V \neq t_G$  on ait  $sp \notin G'(\bar{k})$ . Alors  $u \notin V \otimes \mathbf{C}_{v_0}$  et  $\log d_{v_0}(u, V) \geq -c_{11}U_1$ .

**Remarques 1.6.**

- 1) Les différences entre les versions archimédienne et ultramétrique résident d'une part dans le changement de  $\epsilon$  par  $\mathfrak{r}$  et d'autre part dans une contrainte plus forte sur l'entier  $\mathfrak{a}$  dans le cas ultramétrique. Par ailleurs, toujours dans ce cas, la norme  $\|u_j\|_{v_0}$  du logarithme  $u_j$  n'apparaît plus.
- 2) Soulignons que cette minoration ne dévoile pas la dépendance en le nombre premier  $p$ , dont une partie est dans la constante  $c_{11}$ , non explicite.

Le survol historique qui précède a mis en lumière certaines carences de la théorie ultramétrique. Et pourtant les applications des énoncés  $p$ -adiques existent bel et bien, notamment en ce qui concerne l'étude des points  $S$ -entiers de  $G(k)$  (où  $G$  est une variété abélienne par exemple), comme le montre D. Bertrand au § 3.2 de [5], à la suite des travaux (archimédiens) de S. Lang [27] et D. Masser [29]. Pour une approche très concrète de ce type d'utilisation des formes linéaires de logarithmes, fondée sur la *méthode du logarithme elliptique* développée par Stroeker, Tzanakis, Zimmer *et al.* [23, 46], on pourra consulter le chapitre XIII du livre de N. Smart [45]. À titre d'exemple, voici un résultat que l'on peut déduire de ces méthodes.

**Énoncé 1.7.** *Supposons que  $G$  est une courbe elliptique, munie d'un modèle de Weierstrass  $\mathcal{G}$  (minimal) et notons  $(x, y)$  les coordonnées d'un point  $Q \in G(k)$  relatives à ce modèle. Il existe une constante  $c_{12} = c_{12}(\mathcal{G}, k) \geq 1$  (qui n'est pas effective\*) et une constante absolue  $c_{13} > 0$  telles que, pour tout point  $Q \in G(k)$ , le plus grand nombre premier qui divise un dénominateur de  $x$  est supérieur à*

$$c_{12} \max\{1, h(Q)\}^{\frac{1}{c_{13}|k:\mathbf{Q}|^r}}$$

\*Car intervient dans la preuve une base de Mordell-Weil de  $G(k)$ .

où  $r$  est le rang (de Mordell-Weil) du groupe  $G(k)$ .

D. Bertrand obtient une estimation de cette forme avec  $c_{13} = 13$ ,  $r^2$  à la place de  $r$  et  $G$  à multiplication complexe (voir théorème 3 de [5]). Nous n'effectuerons pas ici la démonstration de cet énoncé puisqu'il suffit de reprendre la démarche (déjà très détaillée) de D. Bertrand en substituant les mesures d'indépendance linéaires que nous obtenons à celles qu'il utilisait dans l'article cité (au bas de la page 48, *op. cit.*). Mentionnons seulement que l'hypothèse sur le point  $p$  du théorème 1.5 est satisfaite car les composantes de  $p$  forment une famille génératrice minimale (sur  $\mathbf{Z}$ ) de  $G(k)$ .

## 2. PRÉPARATIFS

La démonstration des théorèmes 1.4 et 1.5 requiert plusieurs énoncés d'intérêts indépendants que nous présentons dans cette partie.

**2.1. Mise en place de données supplémentaires.** Les énoncés des théorèmes de la section précédente reposent pour une part importante sur le choix des données avec lesquelles nous commençons la démonstration. Il s'avère que si nous ne modifions pas légèrement les données « naturelles »  $G, p, V$ , il est certes encore possible d'obtenir des minorations, mais elles sont plus faibles que celles présentées au § 1.2. C'est pourquoi nous sommes amenés techniquement à rajouter le groupe affine  $\mathbb{G}_a$  à  $G$  en formant  $\mathbb{G}_a \times G$ , puis à considérer le point  $q = (1, p) \in (\mathbb{G}_a \times G)(k)$  et le sous-espace vectoriel  $W$  de  $t_{\mathbb{G}_a} \oplus t_G$  défini par  $t_{\mathbb{G}_a} \oplus V$ . L'élément  $1 \oplus u \in t_{\mathbb{G}_a}(\mathbf{C}_{v_0}) \oplus \mathcal{T}_{v_0}$  est un logarithme du point  $q$ . Pour uniformiser les notations, nous posons  $G_0 := \mathbb{G}_a$  et  $u_0 := 1$ .

Par ailleurs, considérons un entier  $i$  compris entre 1 et  $n$ . Comme l'a montré J.-P. Serre dans [44]\*, le choix d'un diviseur convenable (très ample) sur une compactification lisse de  $G_i$  fournit un plongement  $\Phi_i$  de  $G_i$  dans un espace projectif  $\mathbf{P}_k^{N_i}$ , « compatible » avec la structure de schéma en groupes de  $G_i$ , au sens où il est possible d'exprimer les formules d'additions et de multiplications (par un entier  $m \neq 0$ ) en termes de polynômes homogènes de mêmes degrés ( $\leq m^2$  lorsqu'il s'agit de la multiplication par  $m$ ). De manière plus précise, quitte à effectuer un changement de coordonnées, nous pouvons supposer que l'élément neutre de  $G_i$  est représenté par  $(1 : 0 : \dots : 0) \in \mathbf{P}^{N_i}$ . Soit  $x \in G_i(\mathbf{C}_v)$  et  $(x_0 : \dots : x_{N_i})$  les coordonnées de  $\Phi_i(x)$ . On note

$$(13) \quad A_x^{(i)} = (A_{x,0}^{(i)}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) : \dots : A_{x,N_i}^{(i)}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}))$$

une famille de polynômes (à coefficients dans  $\mathcal{O}_{v_0(k)}$ ) qui exprime la loi d'addition de  $G_i$  au voisinage de  $x$ . Dans cette formule,  $\mathbf{X}$  et  $\mathbf{Y}$  sont des  $(N_i + 1)$ -uplets de variables et chacun des  $A_{x,j}^{(i)}(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ ,  $0 \leq j \leq N_i$ , est homogène de même degré sur chacune des variables  $\mathbf{X}, \mathbf{Y}$ , inférieur à une constante  $c_{14}$ , qui peut être choisie uniforme en  $x$  (quasi-compacité de  $G_i$ ) et en  $i$  (nombre fini). Cette constante ne dépend que de  $(G, \Phi)$ . Dans la suite, pour ne pas alourdir excessivement les notations, nous omettrons souvent la référence à  $x$  en indice et nous écrirons  $A_j^{(i)}$  au lieu de  $A_{x,j}^{(i)}$ . Soit  $v$  une place quelconque

---

\*Et après une éventuelle extension finie du corps de nombres  $k$  afin que la partie multiplicative du plus grand sous-groupe linéaire contenu dans  $G$  soit déployée.



de  $K$ . Il est possible également de représenter l'exponentielle  $v$ -adique de  $G_i(\mathbf{C}_v)$  par des fonctions  $(\theta_{v,i,j})_{0 \leq j \leq N_i}$ , analytiques et sans zéros communs dans  $\mathcal{T}_{i,v}$ , telles que  $(\theta_{v,i,0}(0), \dots, \theta_{v,i,N_i}(0)) = (1, 0, \dots, 0)$  :

$$\exp_{i,v}(z) = (\theta_{v,i,0}(z) : \dots : \theta_{v,i,N_i}(z)), \quad z \in \mathcal{T}_{i,v} .$$

Nous noterons

$$\Theta_{v,i} : z \in \mathcal{T}_{i,v} \mapsto (\theta_{v,i,0}(z), \dots, \theta_{v,i,N_i}(z)) \in \mathbf{C}_v^{N_i+1}$$

et, si  $j$  est un entier naturel inférieur à  $N_i$ ,

$$\Psi_{v,i,j} : z \in \mathcal{T}_{i,v} \setminus \theta_{v,i,j}^{-1}(\{0\}) \mapsto \left( \frac{\theta_{v,i,0}}{\theta_{v,i,j}}(z), \dots, \frac{\theta_{v,i,N_i}}{\theta_{v,i,j}}(z) \right) \in \mathbf{C}_v^{N_i+1} .$$

Bien que ce soit un abus de notations, nous nous permettrons d'écrire ces formules pour  $z \in \mathcal{T}_v$  au lieu de la  $i^{\text{ème}}$  composante de  $z$  sur  $\mathcal{T}_{i,v}$ . Comme nous l'avons vu au § 1.1, lorsque  $v$  est ultramétrique, le choix de la base  $\mathbf{e}$  permet d'écrire chacune des coordonnées  $\theta_{v,i,j}(z)$  sous la forme d'une série  $\sum_{\mathbf{n}} \frac{a_{\mathbf{n},v,i,j}}{\mathbf{n}!} \mathbf{z}^{\mathbf{n}}$  où  $\mathbf{z} = (z_1, \dots, z_{g_i})$  sont les coordonnées de  $z$  dans la base  $\mathbf{e}$  et  $a_{\mathbf{n},v,i,j} \in \mathcal{O}_v$ . De plus, lorsque  $v$  est archimédienne, les fonctions  $\theta_{v,i,j}$ ,  $0 \leq j \leq N_i$ , sont d'ordre analytique  $\rho_i$  et il existe une constante  $c_{15} \geq 1$  telle que, pour tout entier  $i \in \{1, \dots, n\}$ , pour tout vecteur  $z$  de  $\mathcal{T}_{i,v}$ , on ait

$$(14) \quad -c_{15}(1 + \|z\|_v)^{\rho_i} \leq \log \max_{0 \leq j \leq N_i} |\theta_{v,i,j}(z)| \leq c_{15}(1 + \|z\|_v)^{\rho_i} .$$

La  $k$ -structure de l'espace tangent  $t_{G_i}$  entraîne une stabilité par dérivation (selon un vecteur de  $t_{G_i}(k)$ ) de l'anneau  $k[(\theta_{v,i,j}/\theta_{v,i,0})_{0 \leq j \leq N_i}]$ . Ces propriétés seront utilisées aux paragraphes 3.2 et 3.3.

Dans la suite nous noterons  $\mathbf{P}$  l'espace multiprojectif  $\mathbf{P}^1 \times \mathbf{P}^{N_1} \times \dots \times \mathbf{P}^{N_n}$  (le corps de base étant  $k, \bar{k}$  ou  $\mathbf{C}_{v_0}$  selon le contexte). Il est naturellement muni du faisceau canonique  $\mathcal{O}_{\mathbf{P}}(1, \dots, 1)$  et, si  $\mathbf{V}$  est une sous-variété (fermée) de  $\mathbf{P}$ , l'entier  $\deg \mathbf{V}$  (*resp.* le polynôme  $H(\mathbf{V}; X_0, \dots, X_n)$ ) désigne le degré (*resp.* le polynôme de Hilbert-Samuel) de  $\mathbf{V}$  relatif à ce faisceau. On considère également

$$\mathcal{H}(\mathbf{V}; X_0, \dots, X_n) := (\dim \mathbf{V})! \lim_{\alpha \rightarrow +\infty} \frac{H(\mathbf{V}; \alpha X_0, \dots, \alpha X_n)}{\alpha^{\dim \mathbf{V}}}$$

et on étend cette définition aux sous-schémas intègres de  $\mathbf{P}$  en prenant l'adhérence de Zariski dans  $\mathbf{P}$ . Le plongement  $G_0 \times G \hookrightarrow \mathbf{P}$  permet alors de définir le polynôme  $\mathcal{H}(G'; X_0, \dots, X_n)$  pour tout sous-schéma en groupes  $G'$  de  $G_0 \times G$ . Rappelons que ses coefficients sont des entiers naturels de somme égale à  $\deg G'$ .

**2.2. Paramètres et choix d'un sous-groupe.** Dans ce paragraphe, nous introduisons les paramètres qui seront utilisés au cours de la preuve, sans toutefois les définir précisément, afin de conserver des énoncés assez généraux et recyclables ! En effet, bien que les preuves des théorèmes 1.4 et 1.5 soient assez longues et imbriquées, chaque énoncé « local » n'utilise le plus souvent qu'un nombre très restreint de relations entre les paramètres. Il nous apparaît donc plus judicieux de mettre en évidence ces relations pour ensuite expliquer comment choisir les paramètres (ce qui sera fait au § 3.1) au lieu de masquer par un choix prématuré (et nécessairement *imposé*) quelques subtilités qui justifient ce choix. De plus, il est alors possible pour le lecteur

de se faire une idée plus précise de l'influence de chaque étape de la preuve sur le résultat final, et, le cas échéant, en modifiant une étape, d'améliorer ledit résultat (voir en particulier les lemmes 3.1 et 3.2).

Soit  $x, \tilde{D}_0, \tilde{D}_1, \dots, \tilde{D}_n, \tilde{T}, C_0$  des nombres réels strictement positifs et  $0 < S_0 \leq S$  des entiers. Posons, pour chaque entier  $i \in \{0, \dots, n\}$ ,  $\tilde{D}_i^\# := x\tilde{D}_i$  et  $D_i := [\tilde{D}_i^\#]$ , ainsi que  $T := [\tilde{T}]$ . Nous supposons que l'entier  $T$  est non nul. En guise de support à l'intuition, mentionnons que  $x$  est une variable « d'ajustement », les  $D_i$  des degrés de polynômes,  $T$  un ordre de dérivation,  $S$  un nombre de points (tous multiples de  $q$ ) et  $C_0$  une constante (que l'on peut prendre dans  $\mathbf{N}$ ) plus grande que toutes celles qui interviendront dans ce texte.

Lorsque  $G'$  est un sous-groupe algébrique de  $G_0 \times G$ , on note  $\lambda' := \text{codim}_W W \cap t_{G'}$  et  $r' := \text{codim}_G G'$ .

**Définition 2.1.** Soit  $G'$  un sous-groupe algébrique connexe de  $G_0 \times G$  tel que  $t_{G'} + W \neq t_{G_0 \times G}$ . On définit

$$A(G') := \left( \frac{\tilde{T}^{\lambda'} \text{card} \left( \frac{\Sigma_q(S) + G'(\bar{k})}{G'(\bar{k})} \right) \mathcal{H}(G'; \tilde{D}_0, \dots, \tilde{D}_n)}{C_0 \mathcal{H}(G_0 \times G; \tilde{D}_0, \dots, \tilde{D}_n)} \right)^{\frac{1}{r' - \lambda'}}$$

et  $B(G') := A(G')^{\frac{r' - \lambda'}{r'}} \max\{1, A(G')\}^{\frac{\lambda'}{r'}}$ .

Remarquons alors que l'ensemble  $\{B(G'); B(G') \leq B(\{0\})\}$  et  $t_{G'} + W \neq t_{G_0 \times G}$  est fini. En effet, si  $B(G') \leq B(\{0\})$  alors  $A(G') \leq B(\{0\})$  donc  $\mathcal{H}(G'; \tilde{D}_0, \dots, \tilde{D}_n)$  et par conséquent  $\deg G'$  sont bornés. Le degré de  $G'$  étant un entier, il n'y a qu'un nombre fini de valeurs possibles pour lui et comme les coefficients du polynôme  $\mathcal{H}(G'; X_0, \dots, X_n)$  sont des entiers compris entre 0 et  $\deg G'$ , il n'y en a également qu'un nombre fini. Il est alors clair que  $B(G')$  ne prend qu'un nombre fini de valeurs lorsque  $G'$  varie (parmi les sous-groupes tels que  $B(G') \leq B(\{0\})$ ). Cette constatation s'avère utile pour la définition qui va suivre, définition qui permet de choisir convenablement  $x$  et un sous-groupe algébrique particulier de  $G_0 \times G$  en vue à la fois de faciliter l'analyse qui succède à l'utilisation du lemme de multiplicités et en outre de contrôler finement le rang d'un système linéaire considéré ultérieurement (§ suivant). Sans cela, nous aurions été amenés à imposer de « fortes » conditions pour assurer qu'au moins un des paramètres entiers  $D_i$ ,  $1 \leq i \leq n$ , est non nul, ce qui se serait répercuté automatiquement sur la qualité des estimations (à savoir le paramètre  $U_0$  du théorème 1.4 par exemple).

**Définition 2.2.** On définit le nombre réel strictement positif

$$x := \min_{t_{G'} + W \neq t_{G_0 \times G}} \{B(G')\}$$

où  $G'$  varie parmi les sous-groupes algébriques connexes de  $G_0 \times G$  tel que  $t_{G'} + W$  est strictement inclus dans l'espace tangent  $t_{G_0 \times G}$ . On note également  $\tilde{G}$  un sous-groupe parmi les  $G'$  en question tel que  $x = B(\tilde{G})$ .

**Lemme 2.3.** *Supposons qu'il existe un sous-groupe algébrique connexe  $H_1 \subseteq G_0 \times G$  tel que  $t_{H_1} + W \neq t_{G_0 \times G}$  et  $A(H_1) \leq 1$ . Alors  $x \leq 1$  et pour tout*

sous-groupe algébrique connexe  $G'$  de  $G_0 \times G$  vérifiant  $t_{G'} + W \neq t_{G_0 \times G}$ , on a

$$(15) \quad \tilde{T}^{\lambda'} \operatorname{card} \left( \frac{\Sigma_q(S) + G'(\bar{k})}{G'(\bar{k})} \right) \mathcal{H}(G'; D_0^\#, \dots, D_n^\#) \geq C_0 \mathcal{H}(G_0 \times G; D_0^\#, \dots, D_n^\#).$$

De plus, cette inégalité est une égalité pour  $G' = \tilde{G}$ .

*Démonstration.* De l'existence de  $H_1$ , on déduit immédiatement que  $B(H_1) \leq 1$  et donc  $x \leq 1$ . Par ailleurs, pour un schéma en groupes  $G'$  qui vérifie les hypothèses de l'énoncé, considérons le nombre réel

$$\mathfrak{U}_{G'} := \frac{\tilde{T}^{\lambda'} \operatorname{card} \left( \frac{\Sigma_q(S) + G'(\bar{k})}{G'(\bar{k})} \right) \mathcal{H}(G'; D_0^\#, \dots, D_n^\#)}{C_0 \mathcal{H}(G_0 \times G; D_0^\#, \dots, D_n^\#)}.$$

On a  $x^{r'} \mathfrak{U}_{G'} = A(G')^{r' - \lambda'}$  par homogénéité de  $\mathcal{H}$ .

- Si  $A(G') \geq 1$  on a  $\mathfrak{U}_{G'} \geq 1/x^{r'} \geq 1$ .
- Si  $A(G') \leq 1$  on a  $B(G') = A(G')^{\frac{r' - \lambda'}{r'}}$   $\geq x$  donc encore  $\mathfrak{U}_{G'} \geq 1$ .

Cela démontre l'inégalité (15). De plus comme  $A(\tilde{G}) \leq 1$  (sinon  $x = B(\tilde{G})$  serait  $> 1$ ), on a  $x = A(\tilde{G})^{\frac{\tilde{r} - \tilde{\lambda}}{\tilde{r}}}$  puis  $\mathfrak{U}_{\tilde{G}} = 1$  et il y a donc bien égalité dans (15) pour  $\tilde{G}$ .  $\square$

Ce lemme est tout à fait général et ne dépend aucunement des valeurs exactes des  $\tilde{D}_i, \tilde{T}$  etc. qui seront données dans la suite.

**2.3. Rang d'un système d'équations linéaires.** Soit  $(P_0 = 1, P_1, \dots, P_{D_0})$  une base de  $k[X]_{\leq D_0}$  et  $\mathbf{D} = (D_0, \dots, D_n)$ . Considérons l'espace vectoriel  $k[\mathbf{P}]_{\mathbf{D}}$  des polynômes multihomogènes en les variables  $\mathbf{X}_i = (X_0^{(i)}, \dots, X_{N_i}^{(i)})$ ,  $0 \leq i \leq n$  (en posant  $N_0 := 1$ ), de multidegrés  $\mathbf{D}$ . Lorsque  $v$  est une place de  $k$  et

$$P = \sum_{|\lambda_i|=D_i} q_\lambda \prod_{i=0}^n \mathbf{X}_i^{\lambda_i} \in k[\mathbf{P}]_{\mathbf{D}},$$

( $\lambda = (\lambda_0, \dots, \lambda_n) \in \prod_{i=0}^n \mathbf{N}^{N_i+1}$ ,  $p_\lambda \in k$ ), nous noterons  $F_{P,v}$ , ou plus simplement  $F$  s'il n'y a pas d'ambiguïté, l'application

$$(16) \quad F_{P,v} : z \mapsto \sum_{\lambda} q_\lambda P_{\lambda_0}(z_0) \prod_{i=1}^n \Theta_{v,i}^{\lambda_i}(z_i)$$

définie pour  $z = (z_0, z_1, \dots, z_n) \in \mathbf{C}_v \times \mathcal{T}_v$  et à valeurs dans  $\mathbf{C}_v$ . Dans cette expression, nous avons identifié l'élément  $\lambda_0 \in \mathbf{N}^2$  de longueur  $D_0$  avec sa projection sur  $\{0\} \times \mathbf{N}$ , notée aussi  $\lambda_0$  (nous commettrons souvent cet abus de notation). Nous noterons  $(p_\lambda)$  les coefficients de  $P$  dans la base induite par  $P_{\lambda_0}$ , ce qui se traduit pour  $F_{P,v}$  par

$$F_{P,v}(z) = \sum_{\lambda} p_\lambda P_{\lambda_0}(z_0) \prod_{i=1}^n \Theta_{v,i}^{\lambda_i}(z_i).$$

Soit  $E$  la composante de degré  $\mathbf{D}$  de l'espace vectoriel  $k[\mathbf{P}]$  quotienté par l'idéal des polynômes identiquement nuls sur  $G_0 \times G$  (c'est-à-dire tels que

$F_P$  soit identiquement nul). Soit  $\mathbf{w} = (w_0, \dots, w_{g-t})$  une base de  $W$  et  $\mathcal{D}_{w_i}$  l'opérateur différentiel associé à  $w_i$ . Soit  $S_1, T_1$  des entiers naturels non nuls. Considérons le système

$$(17) \quad \forall (s, \boldsymbol{\tau}) \in \mathbf{N} \times \mathbf{N}^{\dim W} ; 0 \leq s \leq S_1, |\boldsymbol{\tau}| \leq T_1, \quad \mathcal{D}_{\mathbf{w}}^{\boldsymbol{\tau}} F_{P, v_0}(s, su) = 0$$

en les variables  $q_{\boldsymbol{\lambda}}$  ou, de manière équivalente, en les variables  $p_{\boldsymbol{\lambda}}$ . En considérant un sous-groupe algébrique  $G'$  de  $G_0 \times G$ , nous allons majorer le rang  $\rho$  du système (17) en fonction de  $G'$ . Pour cela, nous adoptons la même démarche que celle du lemme 6.7 de [36] (voir aussi la preuve du lemme 6.1 de [13]). Soit  $\mathbf{w}'$  une base d'un supplémentaire de  $W \cap t_{G'}$  dans  $W$  et  $\lambda' = \dim W - \dim(W \cap t_{G'})$ . Avec ces données, on montre que  $\rho$  est inférieur au rang du système

$$\forall (s, \boldsymbol{\tau}) \in \mathbf{N} \times \mathbf{N}^{\lambda'} ; 0 \leq s \leq S_1, |\boldsymbol{\tau}| \leq T_1, \quad \mathcal{D}_{\mathbf{w}'}^{\boldsymbol{\tau}} P(sq + G') = 0,$$

ce qui entraîne la majoration

$$\rho \leq \text{card}\{\boldsymbol{\tau} \in \mathbf{N}^{\lambda'} ; |\boldsymbol{\tau}| \leq T_1\} \times \text{card}\left(\frac{\Sigma_q(S_1) + G'(\bar{k})}{G'(\bar{k})}\right) \dim(\mathbf{C}_{v_0}[\mathbf{P}]/I(G'))_{2\mathbf{D}}.$$

En vertu d'un théorème de Yu. Nesterenko (voir [33]), le dernier terme est lui-même contrôlé en fonction de  $\mathcal{H}(G')$  :

$$\dim(\mathbf{C}_{v_0}[\mathbf{P}]/I(G'))_{2\mathbf{D}} \leq c_{16} \mathcal{H}(G'; D'_0, \dots, D'_n)$$

où  $D'_i := \max\{1, D_i\}$  et  $c_{16}$  est une constante (explicite). Nous obtenons ainsi l'existence d'une constante  $c_{17}$  telle que

$$(18) \quad \rho \leq c_{17} T_1^{\lambda'} \text{card}\left(\frac{\Sigma_q(S_1) + G'(\bar{k})}{G'(\bar{k})}\right) \mathcal{H}(G'; D'_0, \dots, D'_n).$$

En appliquant ce résultat au sous-groupe  $G' = \tilde{G}$  introduit dans la définition 2.2, nous avons la

**Proposition 2.4.** *Supposons que  $sq \notin \tilde{G}(\bar{k})$  pour tout  $s \in \{1, \dots, S\}$ . Alors le rang  $\rho$  du système (17) avec  $S_1 := S_0$  et  $T_1 := 2(g+1)T$  vérifie*

$$\rho \leq C_0^{3/2} \frac{S_0}{S} \mathcal{H}(G; D'_0, \dots, D'_n).$$

*Démonstration.* En effet la dernière assertion du lemme 2.3 permet de simplifier la majoration (18) en

$$\rho \leq c_{17} C_0 \frac{\text{card}\left(\frac{\Sigma_q(S_0) + \tilde{G}(\bar{k})}{\tilde{G}(\bar{k})}\right)}{\text{card}\left(\frac{\Sigma_q(S) + \tilde{G}(\bar{k})}{\tilde{G}(\bar{k})}\right)} \mathcal{H}(G; D'_0, \dots, D'_n)$$

car chacune des applications partielles

$$x_i \mapsto \mathcal{H}(\tilde{G}; x_0, \dots, x_n) / \mathcal{H}(G; x_0, \dots, x_n)$$

est décroissante (voir propriété 4.4, p. 414, de [25]) et  $D_i^{\#} \leq 2D'_i$ . Pour conclure, nous utilisons l'hypothèse faite sur  $q$ .  $\square$

**Remarque 2.5.** L'hypothèse sur  $q$  correspond à celle faite sur  $p$  dans les théorèmes 1.4 et 1.5 et elle n'intervient dans toute la preuve qu'à cet endroit précis.

**2.4. Remarque auxiliaire (non-nullité du  $\max\{D_i\}$ ).** Avec la définition du nombre réel  $x$  et quelques hypothèses supplémentaires, il est possible de montrer que les entiers  $D_i$ ,  $1 \leq i \leq n$ , ne peuvent être tous nuls. Ce point est bien sûr crucial pour la construction d'une fonction auxiliaire (voir le début du § 3.4). Néanmoins, il est exclu de montrer\* — sans hypothèses assez fortes (comme par exemple  $t = 1$ ) — que ces entiers sont *tous* non nuls car  $\tilde{D}_i$  peut être  $\leq 1$  et, si les hypothèses du lemme 2.3 sont vérifiées,  $x \leq 1$ . Toutefois, lorsqu'au moins un des  $\tilde{D}_i$  n'est pas trop proche de 0, l'entier  $D_i$  correspondant est non nul comme l'affirme le

**Lemme 2.6.** *Supposons que  $x \leq 1$  et que  $sq \notin \tilde{G}(\bar{k})$  pour tout  $s \in \{1, \dots, C_0 \deg(G_0 \times G)\}$ . Si les deux conditions suivantes sont satisfaites*

- (1)  $S \geq C_0 \deg(G_0 \times G)$ ,
- (2)  $\tilde{T}(S+1) \max_{1 \leq i \leq n} \{\tilde{D}_i\} \geq C_0 \deg(G_0 \times G) \tilde{D}_0$ ,

alors les entiers  $D_i$ ,  $1 \leq i \leq n$ , ne sont pas tous nuls.

*Démonstration.* Par construction, il s'agit de montrer que  $\max_{1 \leq i \leq n} \{x \tilde{D}_i\} \geq 1$ .

Comme  $x = B(\tilde{G}) = A(\tilde{G})^{\frac{\tilde{r}-\tilde{\lambda}}{\tilde{r}}}$  (car précisément  $x \leq 1$  par hypothèse), on a (19)

$$\left( x \max_{1 \leq i \leq n} \{\tilde{D}_i\} \right)^{\tilde{r}} = \frac{\tilde{T}^{\tilde{\lambda}} \text{card} \left( \frac{\Sigma_q(S) + \tilde{G}(\bar{k})}{\tilde{G}(\bar{k})} \right) \mathcal{H}(\tilde{G}; \tilde{D}_0, \dots, \tilde{D}_n) \max_{1 \leq i \leq n} \{\tilde{D}_i\}^{\tilde{r}}}{C_0 \mathcal{H}(G_0 \times G; \tilde{D}_0, \dots, \tilde{D}_n)}.$$

Soit  $\pi_0 : G_0 \times G \rightarrow G_0$  la projection canonique sur  $G_0$  et  $\pi : G_0 \times G \rightarrow G$  celle sur  $G$ . Si  $\pi_0(\tilde{G}) = \{0\}$  alors  $\tilde{G} = \{0\} \times \pi(\tilde{G})$  donc

- $\text{card} \left( \frac{\Sigma_q(S) + \tilde{G}(\bar{k})}{\tilde{G}(\bar{k})} \right) = S + 1$  (car la première composante de  $q$  est 1),
- $\tilde{\lambda} \geq 1$  (car sinon  $W \subseteq t_{\tilde{G}}$  et on aurait  $t_{G_0} \subseteq t_{\pi_0(\tilde{G})} = \{0\}$ ),
- $\mathcal{H}(\tilde{G}; \tilde{D}_0, \dots, \tilde{D}_n) \geq \min_{\substack{i_1 + \dots + i_n = \dim \tilde{G} \\ 0 \leq i_j \leq g_j}} \{\tilde{D}_1^{i_1} \dots \tilde{D}_n^{i_n}\}$

et de la formule (19) on déduit

$$(20) \quad \left( x \max_{1 \leq i \leq n} \{\tilde{D}_i\} \right)^{\tilde{r}} \geq \frac{\tilde{T}(S+1) \max_{1 \leq i \leq n} \{\tilde{D}_i\}}{C_0 \deg(G_0 \times G) \tilde{D}_0}$$

et cette dernière quantité est supérieure à 1 par hypothèse.

Si  $\pi_0(\tilde{G}) = G_0$  on a alors

$$(21) \quad \mathcal{H}(\tilde{G}; \tilde{D}_0, \dots, \tilde{D}_n) \geq \tilde{D}_0 \min_{\substack{i_1 + \dots + i_n = \dim \tilde{G} - 1 \\ 0 \leq i_j \leq g_j}} \{\tilde{D}_1^{i_1} \dots \tilde{D}_n^{i_n}\}$$

et

$$(22) \quad \left( x \max_{1 \leq i \leq n} \{\tilde{D}_i\} \right)^{\tilde{r}} \geq \frac{\tilde{T}^{\tilde{\lambda}} \text{card} \left( \frac{\Sigma_q(S) + \tilde{G}(\bar{k})}{\tilde{G}(\bar{k})} \right)}{C_0 \deg(G_0 \times G)} \geq 1$$

par hypothèse. □

---

\*Contrairement à la tradition : Remarque p. 307 de [36], Lemme 4.23, p. 421, de [25], Lemme 3.27, p. 91, de [26].

**2.5. Lemme de multiplicités.** Rappelons que si  $\mathbf{w} = (w_0, \dots, w_{g-t})$  désigne une base de  $W$ , on note  $\mathcal{D}_{w_i}$  l'opérateur différentiel associé à  $w_i$ . L'objet de ce paragraphe est de montrer qu'avec des hypothèses « minimales » (en particulier sans la nécessité d'un choix très précis des paramètres à cette étape) et le « nouveau » lemme de multiplicités de P. Philippon, il est possible d'affirmer que le système

$$(23) \quad \forall (m, \mathbf{t}) \in \mathbf{N} \times \mathbf{N}^{\dim W}, \quad 0 \leq m \leq (g+1)S, \quad |\mathbf{t}| \leq (g+1)T, \quad \mathcal{D}_{\mathbf{w}}^{\mathbf{t}} F_{P, v_0}(m, mu) = 0$$

n'admet pas de solution polynomiale  $P$  non nulle (les notations sont celles du § 2.3).

**Lemme 2.7.** *Supposons que les entiers  $D_1, \dots, D_n$  ne sont pas tous nuls et que  $x \leq 1$ . Supposons également que pour tout sous-groupe algébrique  $G'$  de  $G$  tel que  $t_{G'} + V \neq t_G$  on ait  $sp \notin G'(\bar{k})$  pour  $s \in \{1, \dots, C_0\}$  et que*

$$(24) \quad \tilde{T} \geq c_{18} \max \left\{ \frac{\tilde{D}_0}{(S+1)^{1-y}}, \tilde{D}_1, \dots, \tilde{D}_n, 1 \right\}$$

avec  $c_{18} = 8^g (\deg G_0 \times G) \prod_{i=1}^n \deg G_i$ . Alors il n'existe pas de polynôme  $P \in E_{v_0} \setminus \{0\}$  tel que la dérivée  $\mathcal{D}_{\mathbf{w}}^{\mathbf{t}} F_{P, v_0}(m, mu)$  soit nulle pour tout  $(m, \mathbf{t}) \in \mathbf{N} \times \mathbf{N}^{\dim W}$ ,  $0 \leq m \leq (g+1)S$  et  $|\mathbf{t}| \leq (g+1)T$ .

**Remarque 2.8.** La constante  $c_{18}$  proposée ici est presque la meilleure possible, au nombre 8 près. Si nous l'avons écrite explicitement, c'est pour permettre l'utilisation de ce lemme dans un contexte « d'effectivité totale ». Pour simplifier certains détails de la preuve qui va suivre, l'on peut se contenter de mettre  $C_0$  à la place de  $c_{18}$ .

*Démonstration.* Supposons qu'un tel polynôme  $P \neq 0$  existe. Alors, d'après le lemme de multiplicités [35], il existe un sous-groupe algébrique connexe et propre  $G'$  de  $G_0 \times G$  tel que

$$(25) \quad T^{\lambda'} \operatorname{card} \left( \frac{\Sigma_q(S) + G'(\bar{k})}{G'(\bar{k})} \right) \mathcal{H}(G'; D'_0, \dots, D'_n) \leq 2^g \mathcal{H}(G_0 \times G; D'_0, \dots, D'_n)$$

où, rappelons-le,  $\lambda' = \operatorname{codim}_W W \cap t_{G'}$  et  $D'_i = \max\{1, D_i\}$ . Nous allons examiner séparément les cas  $t_{G'} + W = t_{G_0 \times G}$  et  $t_{G'} + W \neq t_{G_0 \times G}$  afin de conclure que  $G'$  ne peut pas exister.

Si  $t_{G'} + W = t_{G_0 \times G}$  alors  $\lambda' = r' = \operatorname{codim}_{G_0 \times G} G'$  et l'inégalité (25) entraîne

$$T^{r'} \leq 2^g (\deg(G_0 \times G)) \max\{D_0, \dots, D_n\}^{r'},$$

ce qui contredit l'hypothèse (24) lorsque  $y$  vaut 1 (cas général). Dans le cas semi-abélien ( $y = 0$ ), le groupe  $G'$  s'écrit  $G'_0 \times A$  avec  $G'_0 \subseteq G_0$  et  $A \subseteq G$ . Si  $G'_0 = G_0$  alors l'inégalité (25) implique

$$T^{r'} \mathcal{H}(A; D'_1, \dots, D'_n) \leq 2^g (\deg(G_0 \times G)) (D'_1)^{g_1} \dots (D'_n)^{g_n}$$

ce qui est incompatible avec  $\tilde{T} > 4^g (\deg(G_0 \times G)) \max\{\tilde{D}_1, \dots, \tilde{D}_n\}$ . Si  $G'_0 = \{0\}$  alors

$$\operatorname{card} \left( \frac{\Sigma_q(S) + G'(\bar{k})}{G'(\bar{k})} \right) = S + 1$$

et (25) devient

$$T^{r'}(S+1)\mathcal{H}(A; D'_1, \dots, D'_n) \leq 2^g(\deg(G_0 \times G))D'_0(D'_1)^{g_1} \dots (D'_n)^{g_n}$$

ce qui implique  $T^{r'}(S+1) \leq 2^g(\deg(G_0 \times G))D'_0 \max\{D_1, \dots, D_n\}^{r'-1}$ , ce qui est encore impossible d'après l'hypothèse (24). Ce cas ne peut donc pas se produire et on a nécessairement  $t_{G'} + W \neq t_{G_0 \times G}$ . Soit alors  $1 \leq \kappa_1 < \dots < \kappa_h \leq n$  les entiers pour lesquels  $D_{\kappa_i} \neq 0$ ,  $1 \leq i \leq h$  et notons  $\pi_\kappa : G_0 \times G \rightarrow \prod_{i=1}^h G_{\kappa_i}$  la projection canonique.

Si  $D'_0 = 1$ , on a

$$(26) \quad \binom{\dim G'}{\dim \pi_\kappa(G')} \mathcal{H}(\pi_\kappa(G'); D_{\kappa_1}, \dots, D_{\kappa_h}) \leq \mathcal{H}(G'; D'_0, \dots, D'_n)$$

ce qui entraîne *via* (25)

$$T^{\lambda'} \text{card} \left( \frac{\Sigma_q(S) + G'(\bar{k})}{G'(\bar{k})} \right) \leq c_{19} \frac{\mathcal{H}(\pi_\kappa(G); D_{\kappa_1}, \dots, D_{\kappa_h})}{\mathcal{H}(\pi_\kappa(G'); D_{\kappa_1}, \dots, D_{\kappa_h})}$$

avec

$$c_{19} := \frac{2^g(g+1)!(\dim \pi_\kappa(G'))!(\dim G' - \dim \pi_\kappa(G'))!}{(\dim \pi_\kappa(G))!(\dim G')!} \prod_{\substack{m \neq \kappa_i \\ 1 \leq i \leq h}} \frac{\deg G_m}{g_m!}.$$

Comme chacune des applications partielles

$$x_i \mapsto \frac{\mathcal{H}(\pi_\kappa(G); D_{\kappa_1}, \dots, x_i, \dots, D_{\kappa_h})}{\mathcal{H}(\pi_\kappa(G'); D_{\kappa_1}, \dots, x_i, \dots, D_{\kappa_h})}, \quad 1 \leq i \leq h,$$

est croissante sur  $]0, +\infty[$ , on déduit de la majoration  $D_i \leq x \tilde{D}_i$  l'inégalité (27)

$$T^{\lambda'} \text{card} \left( \frac{\Sigma_q(S) + G'(\bar{k})}{G'(\bar{k})} \right) \leq c_{19} \frac{\mathcal{H}(\pi_\kappa(G); \tilde{D}_{\kappa_1}, \dots, \tilde{D}_{\kappa_h})}{\mathcal{H}(\pi_\kappa(G'); \tilde{D}_{\kappa_1}, \dots, \tilde{D}_{\kappa_h})} x^{\dim \pi_\kappa(G) - \dim \pi_\kappa(G')}.$$

Posons

$$G'' := \pi_\kappa(G') \times \prod_{m \notin \{\kappa_1, \dots, \kappa_h\}} G_m$$

(vu, après permutation éventuelle des facteurs, comme un sous-groupe de  $G_0 \times G$ ). Ce groupe algébrique est différent de  $G$  sinon  $\pi_\kappa(G') = \pi_\kappa(G)$  et l'inégalité (27) entraîne  $T^{\lambda'} \text{card} \left( \frac{\Sigma_q(S) + G'(\bar{k})}{G'(\bar{k})} \right) \leq c_{19}$ . L'hypothèse sur le point  $p$  (appliquée à la projection de  $G'$  sur  $G$ ) entraîne alors  $C_0 \leq c_{19}$  ce qui est impossible si  $C_0$  est assez grand. Nous allons maintenant obtenir à partir de (27) une inégalité pour  $G''$  analogue à (25). En effet, observons d'une part que

$$\frac{\mathcal{H}(G_0 \times G; \tilde{D}_0, \dots, \tilde{D}_n)}{\mathcal{H}(G''; \tilde{D}_0, \dots, \tilde{D}_n)} = c_{20} \frac{\mathcal{H}(\pi_\kappa(G); \tilde{D}_{\kappa_1}, \dots, \tilde{D}_{\kappa_h})}{\mathcal{H}(\pi_\kappa(G'); \tilde{D}_{\kappa_1}, \dots, \tilde{D}_{\kappa_h})}$$

avec  $c_{20} := \frac{(g+1)!(\dim \pi_\kappa(G'))!}{(\dim G'')!(\dim \pi_\kappa(G))!}$  et, d'autre part, on a

- (1)  $\dim \pi_\kappa(G) - \dim \pi_\kappa(G') = \text{codim}_{G_0 \times G} G'' =: r''$ ,
- (2)  $\lambda'' := \text{codim}_W W \cap t_{G''} \leq \text{codim}_W W \cap t_{G'} = \lambda'$  (car  $G' \subseteq G''$ ),
- (3)  $\text{card} \left( \frac{\Sigma_q(S) + G''(\bar{k})}{G''(\bar{k})} \right) \leq \text{card} \left( \frac{\Sigma_q(S) + G'(\bar{k})}{G'(\bar{k})} \right)$ .

L'inégalité (27) devient

$$(28) \quad \frac{T^{\lambda''} \text{card} \left( \frac{\Sigma_q(S) + G''(\bar{k})}{G''(\bar{k})} \right) \mathcal{H}(G''; \tilde{D}_0, \dots, \tilde{D}_n)}{\mathcal{H}(G_0 \times G; \tilde{D}_0, \dots, \tilde{D}_n)} \leq \frac{c_{19}}{c_{20}} x^{r''} .$$

En reprenant alors exactement les mêmes arguments que dans la première partie de la preuve et en remplaçant la constante  $2^g$  par  $c_{19}/c_{20}$  (il faut observer que ce quotient est strictement plus petit que  $4^g \prod_{i=1}^n \deg G_i$ ), on démontre que  $t_{G''} + W \neq t_{G_0 \times G}$ . L'inégalité (28) se lit alors en fonction de  $A(G'')$  (en minorant  $T$  par  $\tilde{T}/2$ ) :

$$(29) \quad A(G'')^{r'' - \lambda''} \leq \left( \frac{2^{\lambda''} c_{19}}{c_{20} C_0} \right) x^{r''} .$$

Comme  $C_0 > 2^g c_{19}/c_{20}$  et  $x \leq 1$ , cette inégalité implique  $A(G'') \leq 1$  donc  $x \leq B(G'') = A(G'')^{\frac{r'' - \lambda''}{r''}}$ , ce qui contredit (29). On vient donc de montrer que nécessairement  $D'_0 = D_0$ , *i.e.*  $D_0 \geq 1$ . À quelques variantes près, la même preuve conduit encore à une contradiction. En effet, considérons  $\pi_{0,\kappa}$  la projection  $G_0 \times G \rightarrow G_0 \times \pi_\kappa(G)$  et posons

$$(30) \quad G^* = \pi_{0,\kappa}(G') \times \prod_{m \notin \{\kappa_1, \dots, \kappa_h\}} G_m,$$

vu comme sous-groupe de  $G_0 \times G$ . Comme

$$(31) \quad \left( \frac{\dim G'}{\dim \pi_{0,\kappa}(G')} \right) \mathcal{H}(\pi_{0,\kappa}(G'); D_0, D_{\kappa_1}, \dots, D_{\kappa_h}) \leq \mathcal{H}(G'; D'_0, \dots, D'_n),$$

un raisonnement similaire au précédent (à partir de l'inégalité (26)) conduit encore à une impossibilité à condition de remplacer  $\pi_\kappa(G')$  par  $\pi_{0,\kappa}(G')$  et  $G''$  par  $G^*$  (dans les constantes  $c_{19}$  et  $c_{20}$  en particulier).

*Conclusion* : Dans tous les cas, l'existence de  $G'$  aboutit à une contradiction, ce qui démontre ainsi le lemme 2.7. □

**2.6. Poids de la droite affine.** Au § 2.3, nous nous sommes équipés d'une famille libre de polynômes  $(P_{\lambda_0})_{\lambda_0 \in \{0, \dots, D_0\}}$  en une variable, qui pourrait être interprétée comme une représentation de l'exponentielle du groupe  $\mathbb{G}_a(\mathbf{C}_v)$  (pour toute place  $v$ ) dans un espace projectif

$$z \mapsto (P_0(z) : \dots : P_{D_0}(z)) .$$

Dans ce paragraphe, nous introduisons une quantité mi-arithmétique mi-analytique qui mesure l'influence du choix de cette famille sur les paramètres  $U_0$  et  $U_1$  des théorèmes 1.4 et 1.5. C'est ce que nous voulons évoquer par la terminologie « poids de  $\mathbb{G}_a$  ».

**Définition 2.9.** Si  $v_0$  est archimédienne, nous appelons *poids* de  $\mathbb{G}_a$  relatif à la famille  $(P_{\lambda_0})$ , aux paramètres  $(T, S, \epsilon)$  et à la place  $v_0$ , la quantité

$$\aleph((P_{\lambda_0})) := h \left( \left\{ \frac{1}{t_0!} P_{\lambda_0}^{(t_0)}(s), \begin{array}{l} 0 \leq \lambda_0 \leq D_0 \\ 0 \leq s \leq S \\ 0 \leq t_0 \leq T \end{array} \right\} \right) + \frac{1}{D} \log \max_{\substack{0 \leq t_0 \leq T \\ |z| \leq \epsilon S}} \left| \frac{1}{t_0!} P_{\lambda_0}^{(t_0)}(z) \right|_{v_0} .$$



Lorsque  $v_0$  est ultramétrique, le poids de  $\mathbb{G}_a$  (relatif à  $(T, S, \mathfrak{r})$ ) est la quantité obtenue en remplaçant ci-dessus  $\epsilon S$  (qui est en indice dans le dernier terme) par  $\mathfrak{r}$ .

Cette définition appelle quelques commentaires. En premier lieu, le degré  $D$  qui intervient est relatif à un corps de nombres  $k$  contenant tous les coefficients des  $P_{\lambda_0}$ . Il ne joue un véritable rôle que lorsque  $k$  est le corps de définition des  $P_{\lambda_0}$  (comme, du reste, la place  $v_0$ ) et doit donc être interprété simplement comme un coefficient pondérateur. Le poids de  $\mathbb{G}_a$  est le terme résiduel qui provient de l'introduction même du groupe  $\mathbb{G}_a$  dans la preuve des théorèmes 1.4 et 1.5. Il se manifeste — tous calculs faits — à travers la condition  $U \gg D\mathfrak{N}((P_{\lambda_0}))$ , où  $U$  représente  $U_0$  ou  $U_1$  selon le cas et  $\gg$  signifie supérieur ou égal à un constante près. Cet inconvénient s'avère largement compensé par au moins deux avantages que procurent  $\mathbb{G}_a$ . D'une part, il s'accompagne d'un paramètre  $D_0$  qui facilite la construction du polynôme auxiliaire en rendant la condition de Siegel plus simple à satisfaire. D'autre part, il permet de modifier le point  $p$  en un point  $q = (1, p)$  moins vulnérable aux phénomènes de torsion modulo des sous-groupes particuliers de  $G_0 \times G$  (à commencer par le sous-groupe nul,  $q$  n'étant alors jamais de torsion). Cela est particulièrement important pour le lemme de multiplicité qui fait intervenir le cardinal du quotient  $(\Sigma_q(S) + G'(\overline{k}))/G'(\overline{k})$ ,  $G'$  étant un sous-groupe algébrique de  $\mathbb{G}_a \times G$  (voir à cet égard le § 2.5).

Il me semble que le poids de  $\mathbb{G}_a$  tel qu'il est défini\* est sous-jacent à un grand nombre de résultats sur les aspects quantitatifs de la théorie des formes linéaires de logarithmes, du moins pour ceux d'entre eux dont la preuve repose sur la méthode de Baker. À ma connaissance, il n'existe pas de procédé pour construire une base  $(P_{\lambda_0})$  qui soit la mieux adaptée aux données en minimisant le poids de  $\mathbb{G}_a$ . Toutefois, à la fin des années soixante et à la suite des premiers travaux de Baker, N.I. Fel'dman a remarqué qu'il existait au moins une famille de tels polynômes qui convenaient mieux que les polynômes de la base canonique [18]. Elle provient des polynômes binomiaux que nous avons déjà rencontrés dans l'introduction (voir (7)) et se trouve à mi-chemin entre ces polynômes et ceux de la base canonique†. Nous allons nous servir d'une variante de ces polynômes, imaginée par E.M. Matveev, qui s'avère plus maniable au moment du choix des paramètres, tout en conservant les avantages de la base de Fel'dman. Étant donné  $\lambda_0, D_0^b \in \mathbf{N}$ , le polynôme de Matveev  $\delta_{D_0^b}(X; \lambda_0)$  est  $\Delta_{D_0^b}(X)^q \Delta_r(X)$  où les entiers  $q$  et  $r$  sont respectivement le quotient et reste de la division euclidienne de  $\lambda_0$  par  $D_0^b$ . Le degré de  $\delta_{D_0^b}(X; \lambda_0)$  est  $\lambda_0$ . Par conséquent, lorsque  $D_0^b$  est fixé, la famille  $\delta_{D_0^b}(X; \lambda_0)$ ,  $\lambda_0 = 0, \dots, D_0$ , forme une base de  $k[X]_{\leq D_0}$ . L'intérêt d'une telle base peut se comprendre à partir du

---

\*Il existe des variantes, comme, par exemple, lorsque  $G$  est une variété abélienne à multiplication complexe. Dans ce cas, il est plus judicieux de choisir non pas  $s \in \mathbf{N}$  mais  $s \in \text{End}(G)$  et d'imposer  $|s| \leq S$ . Nous renvoyons le lecteur intéressé par ce cas particulier à l'article [1] ainsi qu'à la preuve (à venir) du résultat annoncé dans [2].

†Étant donné deux entiers  $\alpha$  et  $\beta$ , la famille des polynômes de Fel'dman en question est  $1, \Delta_\alpha(X+x)^y$ ,  $0 \leq x < \alpha$ ,  $1 \leq y \leq \beta$ . On vérifie qu'elle forme une base de l'espace des polynômes de degré  $\leq \alpha\beta + 1$ .

**Lemme 2.10.** *Avec les notations ci-dessus, il existe une constante absolue  $c_{21} \geq 1$  pour laquelle nous disposons des estimations suivantes.*

- Si  $v_0$  est archimédienne alors

(32)

$$\begin{aligned} & \aleph \left( \left( \delta_{D_0^b}(X; \lambda_0) \right)_{\lambda_0} \right) \\ & \leq c_{21} \left( D_0 \log \left( e + \frac{S}{D_0^b} \right) + \min(D_0, T) D_0^b + \frac{D_0}{D} \log \left( 1 + \frac{\epsilon S}{D_0^b} \right) \right). \end{aligned}$$

- Si  $v_0$  est ultramétrique alors l'inégalité ci-dessus reste vraie en remplaçant le dernier terme par  $\frac{D_0}{D} \log(\tau)$ .

Dans le cas archimédien la démonstration de cette majoration découle des estimations sur les polynômes de Matveev qui sont données dans le livre de M. Waldschmidt [49], p. 269 et suivantes. Dans le cas ultramétrique, l'évaluation de la dérivée  $\delta_{D_0^b}(X; \lambda_0, t_0)$  pour  $t_0 \leq T$  et  $|z| \leq \tau$  repose sur la formule de Leibniz et l'existence d'une constante absolue  $c_{22} > 0$  telle que  $|\lambda_0!|_{v_0} \geq c_{22}^{\lambda_0}$ . Notons par ailleurs qu'en choisissant  $D_0^b = 1$  l'on retrouve une estimation du poids de la famille  $(X^{\lambda_0})_{0 \leq \lambda_0 \leq D_0}$ :

$$\aleph((X^{\lambda_0})) \leq c_{22} D_0 \left( \log S + \frac{\log \epsilon}{D} \right)$$

(et  $\tau$  à la place de  $\epsilon$  dans le cas ultramétrique).

Quoi qu'il en soit, les choix de  $D_0^b$  et  $D_0$  qui minimisent le membre de droite de (32) semblent dépendre pour une large part du contexte qui « fixe » la valeur des paramètres  $T$  et  $S$ , en particulier vis-à-vis de la hauteur du sous-espace  $V$ . Avec des considérations élémentaires, il est pourtant possible de préciser le « meilleur » choix pour  $D_0^b$ . Pour simplifier, plaçons-nous dans le cas archimédien et mettons à l'écart le paramètre  $\epsilon$  (souvent constant dans la pratique). Le raisonnement qui suit est valide aux constantes numériques près. Ceci étant, nous constatons de prime abord que, si  $T \geq D_0$ , il est préférable de choisir la base canonique (*i.e.*  $D_0^b = 1$ ) car ou bien  $D_0^b \geq \log S$  et alors  $\min\{T, D_0\} D_0^b \geq D_0 \log S$ , ou bien  $D_0^b \leq \log S$  et  $D_0 \log \left( e + \frac{S}{D_0^b} \right) \gtrsim D_0 \log S$ . Dans les deux cas le majorant du poids de la base de Matveev contient celui de la base canonique. Inversement, si  $T \leq D_0$ , la condition

$$U \gg D \aleph \left( \left( \delta_{D_0^b}(X; \lambda_0) \right) \right)$$

se scinde en trois inégalités

1.  $U \gg D D_0 \log(e + S/D_0^b)$ ,
2.  $U \gg \log(1 + \epsilon S/D_0^b)$ ,
3.  $U \gg D T D_0^b$ .

Ce sont les seules conditions où  $D_0^b$  apparaît « indépendamment » de  $D_0$ . Nous sommes alors conduit naturellement à opter pour un entier  $D_0^b$  maximal, inférieur à  $U/DT$ , afin que les deux premières conditions soient plus simples à remplir. Ces principes ont guidé les choix de  $D_0^b$  et  $D_0$ , proposés au § 3.1.

**Remarque 2.11.** Bien que tous les théorèmes énoncés reposent sur le même choix de la base  $(P_i)_i$  (base des polynômes de Matveev en l'occurrence), il nous semble préférable de conserver une base indifférenciée jusqu'à la toute fin de la démonstration (§ 3.6). Outre une justification *a posteriori* du choix des paramètres, cela permet également d'obtenir d'une part des variantes d'énoncés à moindre frais et d'autre part une meilleure compréhension du rôle joué par ce facteur  $\mathbb{G}_a$  supplémentaire au cours de la preuve, comme nous venons de le voir. Ce procédé a déjà été mis en oeuvre (sous une forme très légèrement différente) par M. Waldschmidt (voir [49], pp. 477 – 480).

**2.7. Lemme de Siegel absolu.** Trouver une (base de) solution(s) de « petite » hauteur d'un système linéaire à coefficients algébriques est bien souvent une étape imposée au cours d'une démonstration de transcendance (à l'exception, bien sûr, de celles qui reposent sur la méthode des déterminants d'interpolation ou sur la méthode des pentes). Dans [42], D. Roy et J. Thunder ont mis en évidence la différence de petitesse de la hauteur d'une base de solutions que l'on peut espérer selon que cette base est à coefficients dans un corps de nombres fixé à l'avance (auquel cas la borne dépend du discriminant absolu de ce corps) ou que cette base est seulement à coefficients algébriques (auquel cas seule la hauteur du système intervient dans la majoration). Dans cette seconde perspective, on parle de lemme de Siegel *absolu*. Par ailleurs, intervient également dans ces bornes le rang du système linéaire, rang qui revêt une importance non négligeable pour une des deux applications de ce type de lemme que nous avons en vue dans cet article. C'est pourquoi nous n'utiliserons pas tel quel l'énoncé de Roy & Thunder mais plutôt le raffinement suivant, décrit par S. David et P. Philippon dans [15], § 4.2, et qui repose sur une inégalité de S. Zhang relative aux minima successifs d'une variété arithmétique.

**Lemme 2.12.** *Soit  $m$  un entier naturel  $\geq 1$  et  $V$  un sous-espace vectoriel de  $\overline{\mathbb{Q}}^{m+1}$ , de dimension  $d \geq 1$ . Il existe une base  $(v_1, \dots, v_d)$  de  $V$  telle que*

$$(33) \quad \sum_{i=1}^d h_{L^2}(v_i) \leq h(V) + d \log(d)$$

où  $h(V)$  est la hauteur (logarithmique absolue) de Schmidt de  $V$ .

**Remarque 2.13.** Le résultat précédemment cité de Roy & Thunder conduit à une majoration de ce type mais avec un terme linéaire en  $d^2$  en lieu et place du  $d \log(d)$ .

*Démonstration.* On démontre un résultat un peu plus fort : pour tout nombre réel  $\epsilon > 0$ , il existe une base  $(v_1, \dots, v_d)$  de  $V$  (qui dépend de cet  $\epsilon$ ) telle que

$$(34) \quad \sum_{i=1}^d h_{L^2}(v_i) \leq h(V) + \sum_{j=1}^{d-1} \sum_{i=1}^j \frac{1}{2^i} + \epsilon.$$

Pour cela, nous reprenons l'argumentation donnée dans la preuve du lemme 4.7 de [15] et la remarque qui la suit. Soit  $\overline{\mathcal{O}(1)}$  le fibré en droites hermitien sur  $\mathbf{P}_{\mathbb{Z}}^m$  obtenu à partir du faisceau canonique  $\mathcal{O}(1)$  muni de la métrique de Fubini-Study. La hauteur relative à  $\overline{\mathcal{O}(1)}$  (au sens arakéliovien

du terme, voir référence ci-après) sur les points de  $\mathbf{P}_{\mathbf{Z}}^m(\overline{\mathbf{Q}})$  est la hauteur  $L^2$  introduite dans le paragraphe « Notations et Conventions ». Soit  $\overline{L} := \overline{\mathcal{O}(1)}|_{\mathbf{P}(\mathbf{V}^\vee)}$  la restriction de ce fibré hermitien à la sous-variété linéaire  $\mathbf{P}(\mathbf{V}^\vee)$  (de dimension absolue  $d$ ) définie par  $\mathbf{V}$  (à l'aide de son dual  $\mathbf{V}^\vee$ ). Pour tout entier  $i \in \{1, \dots, d\}$ , considérons les nombres réels  $e_i$  définis par

$$e_i := \sup_{\text{codim } Y=i} \inf_{x \in \mathbf{P}(\mathbf{V}^\vee)(\overline{\mathbf{Q}}) \setminus Y} \{h_{L^2}(x)\}$$

où  $Y$  parcourt les sous-variétés (fermées) de  $\mathbf{P}(\mathbf{V}^\vee)(\overline{\mathbf{Q}})$  de codimension  $i$ . Le couple  $(\mathbf{P}(\mathbf{V}^\vee), \overline{L})$  satisfait aux hypothèses du théorème 5.2 de [56] (l'hypothèse de semi-amplitude arithmétique de  $\overline{L}$  résulte par exemple du théorème 3.5, *ibid.*) qui, en termes des  $e_i$  ci-dessus, s'écrit alors\*

$$(35) \quad e_1 + \dots + e_d \leq h_F(\mathbf{P}(\mathbf{V}^\vee))$$

où

$$h_F(\mathbf{P}(\mathbf{V}^\vee)) := \widehat{\text{deg}}_n \left( \widehat{c}_1 \left( \overline{\mathcal{O}(1)} \right)^d |_{\mathbf{P}(\mathbf{V}^\vee)} \right)$$

est la hauteur de Faltings de la sous-variété  $\mathbf{P}(\mathbf{V}^\vee)$ , au sens de [10], définition 3.1.1 et § 4.1.2 ( $\widehat{\text{deg}}_n$  est le degré d'Arakelov normalisé). Cette quantité se compare à la hauteur de Schmidt de  $\mathbf{V}$  *via* la première formule de la proposition 4.1.2 de [10] et la remarque qui lui succède :

$$h_F(\mathbf{P}(\mathbf{V}^\vee)) = h(\mathbf{V}) + \sum_{j=1}^{d-1} \sum_{i=1}^j \frac{1}{2i}.$$

En vertu de l'inégalité de Zhang (35), il ne reste donc plus qu'à prouver l'existence d'une base  $v_1, \dots, v_d$  de  $\mathbf{V}$  telle que

$$(36) \quad \sum_{i=1}^d h_{L^2}(v_i) \leq e_1 + \dots + e_d + \epsilon.$$

Cela résulte presque immédiatement de la définition même des  $e_i$ . En effet, on a

$$e_d = \inf \{h_{L^2}(x); x \in \mathbf{P}(\mathbf{V}^\vee)(\overline{\mathbf{Q}})\}$$

donc il existe  $v_1 \in \mathbf{P}(\mathbf{V}^\vee)(\overline{\mathbf{Q}}) = \mathbf{V} \setminus \{0\}$  tel que  $h_{L^2}(v_1) \leq e_d + \epsilon/d$ . Soit  $Y_1$  l'adhérence de Zariski de  $\{v_1\}$  dans  $\mathbf{P}(\mathbf{V}^\vee)(\overline{\mathbf{Q}})$ . On a

$$e_{d-1} \geq \inf \{h_{L^2}(x); x \in \mathbf{P}(\mathbf{V}^\vee)(\overline{\mathbf{Q}}) \setminus Y_1\}$$

donc il existe  $v_2 \in \mathbf{P}(\mathbf{V}^\vee)(\overline{\mathbf{Q}}) \setminus Y_1$  (c'est-à-dire que  $v_1$  et  $v_2$  — vus comme vecteurs de  $\mathbf{V}$  — sont linéairement indépendants) tel que  $h_{L^2}(v_2) \leq e_{d-1} + \epsilon/d$ . De même, la minoration  $e_{d-2} \geq \inf \{h_{L^2}(x); x \in \mathbf{P}(\mathbf{V}^\vee)(\overline{\mathbf{Q}}) \setminus Y_2\}$  où  $Y_2$  est le sous-espace linéaire de  $\mathbf{P}(\mathbf{V}^\vee)$  provenant de  $\overline{\mathbf{Q}}.v_1 \oplus \overline{\mathbf{Q}}.v_2$  entraîne l'existence de  $v_3$  etc. Nous avons ainsi construit une base  $v_1, \dots, v_d$  de  $\mathbf{V}$  qui satisfait à l'inégalité (36) et donc à (34). Dans cette dernière inégalité, la double somme est majorée par  $d \log(d)/2$  comme cela se voit facilement par comparaison avec des intégrales. La démonstration du lemme 2.12 se termine en choisissant  $\epsilon = d \log(d)/2$  (même si  $d = 1$ ).  $\square$

\*Il faut noter ici que le degré géométrique de  $\mathbf{P}(\mathbf{V}^\vee)$  vaut 1.

Les premières étapes qui ont conduit à la mise en place des paramètres s'achèvent ici. Les paragraphes suivants forment le noyau dur de la démonstration. Ils concernent pour l'essentiel des estimations de nature arithmétique et analytique sur certains coefficients de Taylor (ou jets) liés aux fonctions  $F_P$  introduites précédemment.

### 3. DÉMONSTRATIONS DES THÉORÈMES 1.4 ET 1.5

Nous fixons une fois pour toutes un corps de nombres  $K$ , qui contient  $k$ , de sorte que tous les nombres algébriques considérés au cours de la preuve et qui, bien sûr, sont en nombre fini, appartiennent à  $K$ . Il est commode d'introduire un tel corps pour les estimations locales de ces nombres algébriques. Cependant, seules leurs hauteurs (absolues) interviendront réellement au cours de la preuve et non le degré relatif  $[K : k]$  de ce corps de nombres (à l'exception notable d'une apparition furtive au début du § 3.6).

*Description de la preuve.* La démarche suivie est assez classique et elle est commune aux deux théorèmes à démontrer. Il s'agit de construire un élément  $\alpha$  de  $K \setminus \{0\}$ , de « petite » hauteur, et dont toutes les valeurs absolues  $v$ -adiques, pour  $v$  une place de  $K$  au-dessus de  $v_0$ , sont majorées par un terme linéaire en la distance  $d_{v_0}(u, V)$ . De sorte que de la formule du produit appliquée à  $\alpha$  se déduit une minoration de cette distance, ce qui est l'assertion des théorèmes 1.4 et 1.5. Comme cela est fréquent en transcendance, l'élément  $\alpha$  en question provient d'un coefficient de Taylor d'une fonction de la forme  $P \circ \exp_{(G_0 \times G)(\mathbf{C}_{v_0})}$  restreinte à l'espace  $W$ . Dans cette expression,  $P$  est un certain polynôme à bâtir et  $\exp_{(G_0 \times G)(\mathbf{C}_{v_0})} := (\exp_{G_0(\mathbf{C}_{v_0})}, \exp_{v_0})$  désigne l'exponentielle (à valeurs dans l'espace multiprojectif  $\mathbf{P}$ ) du groupe de Lie  $(G_0 \times G)(\mathbf{C}_{v_0})$ . Le polynôme  $P$  n'est pas quelconque. Il doit satisfaire à certaines propriétés d'annulations (comme celles déjà vues au § 2.3) et être de hauteur suffisamment petite. Sa construction repose sur le lemme de Siegel absolu énoncé dans le paragraphe précédent. Toute la difficulté consiste à évaluer avec précision la hauteur du système d'équations traduisant les conditions d'annulations de  $P$ . En décomposant cette hauteur en somme de termes locaux, on s'aperçoit alors que les bornes sont les mêmes que celles souhaitées pour  $\alpha$ . C'est pourquoi, après un premier paragraphe décrivant les paramètres utilisés dans la preuve, nous commençons par démontrer des estimations  $p$ -adiques et archimédiennes assez générales de certains coefficients de Taylor, destinées à être appliquées à la hauteur du système (§ 3.4) et à  $\alpha$  (§ 3.6). Le nombre  $\alpha$  proprement dit est quant à lui défini au début du § 3.5. Nous vérifions dans la foulée qu'il est non nul puis nous obtenons les majorations « fines » souhaitées de ses valeurs absolues aux places  $v$  de  $K$  qui sont au-dessus de  $v_0$ . Une fois celles-ci démontrées, nous pourrions conclure (§ 3.6).

**3.1. Choix des paramètres.** Au début du § 2.2, nous avons introduit des paramètres  $\tilde{D}_0, \dots, \tilde{D}_n, \tilde{T}, S, S_0$  avec lesquels nous avons pu établir des énoncés pourvus d'une certaine souplesse d'utilisation, au sens où ils ne dépendaient pas des valeurs précises de ces paramètres mais seulement de quelques relations assez simples entre eux. Nous avons également étudié les

effets des choix de certaines familles de polynômes  $(P_{\lambda_0})$  sur la qualité de la mesure finale (§ 2.6).

Dans ce paragraphe, nous précisons toutes ces données pour la démonstration proprement dite des théorèmes 1.4 et 1.5. Cependant les choix que nous dévoilons ici ne seront véritablement utilisés qu'à l'étape « Extrapolation » (§ 3.5) *via* les lemmes 3.1 et 3.2 qui vont suivre. Ainsi le lecteur qui souhaiterait ne pas entrer trop dans ces détails techniques et, qui plus est, spécifiques à ce texte, est invité à passer directement au point suivant de la démonstration, sans pour autant en perdre le fil conducteur. Qu'il note au préalable la définition de l'ensemble  $\Upsilon$  qui interviendra dans la suite :

$$\Upsilon := \left\{ (s, \mathbf{t}) \in \mathbf{N} \times \mathbf{N}^{\dim W}; 0 \leq s \leq S_0 \text{ et } |\mathbf{t}| \leq 2(g+1)T \right\}.$$

Dans un souci de clarté, nous distinguons les choix selon que  $v_0$  est une place archimédienne ou ultramétrique.

3.1.1.  $v_0$  *archimédienne*. Rappelons que  $\mathbf{a}$  désigne un entier supérieur ou égal à  $D \max\{1, h(V)\}/\log \epsilon$ . Le paramètre  $C_0$  est une constante suffisamment grande par rapport à toutes les constantes  $c_i$  qui interviendront dans la suite. Posons alors  $S_0 := C_0^3 \mathbf{a}$ ,  $S := C_0^6 \mathbf{a}$ ,

$$U := C_0^{25g} (\mathbf{a} \log \epsilon) \left( \mathbf{a}^y + \frac{D}{\log \epsilon} \log \left( e + \frac{D}{\log \epsilon} \right) \right)^{1/t} \\ \times \prod_{i=1}^n \left( 1 + \frac{D \max_{0 \leq s \leq (g+1)C_0^6 \mathbf{a}} \{h(sp_i)\} + (\epsilon \mathbf{a} \|u_i\|_{v_0})^{\rho_i}}{\mathbf{a} \log \epsilon} \right)^{g_i/t}$$

(il s'agit essentiellement de  $C_0^{25g} U_0$  mais où la constante « indéfinie »  $c_7$  qui est en indice du  $\max\{h(sp_i)\}$  dans  $U_0$  est remplacée par  $(g+1)C_0^6$ ),  $\tilde{T} := \frac{C_0 U}{S_0 \log \epsilon}$ ,

$$\tilde{D}_i := \frac{U}{C_0^2 \left( D \max_{0 \leq s \leq (g+1)S} \{h(sp_i)\} + (\epsilon S \|u_i\|_{v_0})^{\rho_i} + S_0 \log \epsilon \right)}$$

si  $1 \leq i \leq n$ . Soit également

$$D_0^b := \left[ \frac{S_0 \log \epsilon}{DC_0^3} \right] \quad \text{et} \quad \tilde{D}_0 := \frac{U}{C_0^4 \left( D \log \left( e + \frac{D}{\log \epsilon} \right) + S_0^y \log \epsilon \right)}.$$

La définition 2.2 introduit un nombre réel  $x > 0$  et l'on note  $D_0 := [x \tilde{D}_0]$ . Considérons alors pour  $(P_{\lambda_0})$  la famille des polynômes de Matveev

$$(\delta_{D_0^b}(X; \lambda_0))_{0 \leq \lambda_0 \leq D_0}$$

définie au § 2.6.

Voici résumées en quelques lignes les principales conditions que satisfont ces paramètres.

**Lemme 3.1.** *On a*

- ①  $\tilde{T} \geq C_0^2$ ,  $S/S_0 \geq C_0^2$ ,  $S_0 \geq C_0^2$ ,
- ②  $\tilde{T} \geq C_0 \max \left\{ \tilde{D}_0 / (S+1)^{1-y}, \tilde{D}_1, \dots, \tilde{D}_n \right\}$ ,
- ③  $\tilde{T}^{g-t+1} (S+1) \leq C_0 \tilde{D}_0 \tilde{D}_1^{g_1} \dots \tilde{D}_n^{g_n}$ ,

- ④  $U \geq C_0^{3/2} D \aleph((P_{\lambda_0}))$ ,
- ⑤  $S_0 \log \mathfrak{e} \geq C_0^3 D \max\{1, h(V)\}$ ,
- ⑥  $U \geq C_0^2 D_i (D \max_{0 \leq s \leq (g+1)S} \{h(sp_i)\} + (\mathfrak{e} S \|u_i\|_{v_0})^{\rho_i})$  pour tout  $1 \leq i \leq n$ .

*Démonstration.* Les points ① et ② découlent immédiatement de la définition des paramètres. L'inégalité ③ correspond précisément à la définition de  $U_0$  à une constante près. La condition ④ découle du lemme 2.10 et les points ⑤ et ⑥ sont évidents à partir des définitions de  $\mathfrak{a}$  et des  $\tilde{D}_i$ .  $\square$

Accessoirement, on pourra aussi noter que  $U \geq C_0^2 D \log(D_0 S)$ . La condition ③ et le lemme 2.3 avec  $H_1 = \{0\}$  impliquent  $x \leq 1$ .

3.1.2.  $v_0$  ultramétrique. Reprenons les notations  $\mathfrak{r}, \mathfrak{a}$  du théorème 1.5. Posons  $S_0 := C_0^3 \mathfrak{a}$ ,  $S := C_0^6 \mathfrak{a}$ ,

$$U := C_0^{25g} (\mathfrak{a} \log \mathfrak{r}) \left( \mathfrak{a}^y + \frac{D}{\log \mathfrak{r}} \log \left( e + \frac{D}{\log \mathfrak{r}} \right) \right)^{1/t} \prod_{i=1}^n \left( 1 + \frac{D \max_{0 \leq s \leq (g+1)C_0^6 \mathfrak{a}} \{h(sp_i)\}}{\mathfrak{a} \log \mathfrak{r}} \right)^{g_i/t},$$

puis  $\tilde{T} := C_0 U / (S_0 \log \mathfrak{r})$  et

$$\tilde{D}_i := \frac{U}{C_0^2 (D \max_{s \leq (g+1)S} \{h(sp_i)\} + S_0 \log \mathfrak{r})} \quad \text{pour } 1 \leq i \leq n.$$

Soit

$$D_0^b := \left\lceil \frac{S_0 \log \mathfrak{r}}{C_0^3 D} \right\rceil \quad \text{et} \quad \tilde{D}_0 := \frac{U}{C_0^4 \left( D \log \left( e + \frac{D}{\log \mathfrak{r}} \right) + S_0^y \log \mathfrak{r} \right)}.$$

Ensuite, comme dans le cas archimédien, nous prenons le nombre réel  $x > 0$  de la définition 2.2 (p. 17), nous formons l'entier  $D_0 := \lceil x \tilde{D}_0 \rceil$  et la famille  $(P_{\lambda_0})$  est la même que celle du cas archimédien.

Les conditions remplies par ces paramètres sont les conditions ①, ②, ③ du lemme 3.1 (en particulier, on a  $x \leq 1$ ) et celles apportées par le lemme suivant.

**Lemme 3.2.** *On a*

- ④  $U \geq C_0^{3/2} D \aleph((P_{\lambda_0}))$ ,
- ⑤  $S_0 \log \mathfrak{r} \geq C_0 (D \max\{1, h(V)\} + \log S_0)$ ,
- ⑥  $U \geq C_0^2 D D_i \max_{s \leq (g+1)S} \{h(sp_i)\}$ .

*Démonstration.* Ces trois inégalités sont faciles à vérifier à partir du choix des paramètres, la première, par exemple, étant une conséquence de la majoration

$$\aleph((P_{\lambda_0})) \leq c_{21} \left( D_0 \log \left( e + \frac{S}{D_0^b} \right) + T D_0^b + \frac{D_0 \log \mathfrak{r}}{D} \right)$$

induite par le lemme 2.10.  $\square$

**Remarques 3.3.**

- (1) La présence du logarithme de  $S_0$  dans la condition **5**, présence qui sera requise lors de l'extrapolation  $p$ -adique\*, explique la modification du paramètre  $\mathfrak{a}$  par rapport au cas archimédien, avec l'ajout du terme

$$\frac{\log^+((\log(\mathfrak{r}))^{-1})}{\log(\mathfrak{r})}.$$

- (2) Il est facile de vérifier qu'avec ces choix les hypothèses du lemme 2.6 sont satisfaites et, par conséquent, qu'au moins un des entiers  $D_1, \dots, D_n$  est non nul. En revanche, bien que  $\tilde{D}_0$  soit clairement supérieur à 1, il se pourrait que  $D_0$  soit nul<sup>†</sup>. Cela n'a (paradoxalement) aucune conséquence dans la suite de la démonstration.
- (3) Lorsque dans la preuve on choisit de mettre sur la partie  $\mathbb{G}_a$  la base des monômes usuels, cela remplace le terme  $\mathfrak{a}^y + \frac{D}{\log \epsilon} \log(e + D/\log \epsilon)$  qui est dans  $U$  par  $\mathfrak{a}^y + \frac{D \log \mathfrak{a}}{\log \epsilon}$ . Cela rajoute donc une dépendance supplémentaire en le logarithme de la hauteur du sous-espace  $V$ .

3.1.3. *Choix d'une base de  $W$ .* Soit  $w_0$  la base canonique de  $t_{\mathbb{G}_a}$  et  $(w_1, \dots, w_{g-t})$  une base de  $V \otimes \overline{\mathbf{Q}}$  fournie par le lemme 2.12 (l'espace  $V \otimes \overline{\mathbf{Q}}$  étant identifié à un sous-espace de  $\overline{\mathbf{Q}}^g$  via la base  $\mathbf{e}$  de  $t_G$  introduite au § 1.1). Par définition, nous avons  $\|w_0\|_v = 1$  pour toute place  $v$  de  $K$  et  $h_{L^2}(w_1) + \dots + h_{L^2}(w_{g-t}) \leq h(V) + g \log(g)$ . Nous supposons que ces vecteurs sont définis sur  $K$  (voir préambule) et que chacune des normes  $\|w_j\|_v$  avec  $j \in \{1, \dots, g-t\}$  et  $v$  une place de  $K$  au-dessus de  $v_0$  est supérieure ou égale à 1. Cela est toujours possible quitte à multiplier  $w_i$  par un nombre rationnel convenable et à utiliser l'invariance par homothétie des hauteurs  $L^2$ . De cette manière, nous fixons une base  $\mathbf{w} := (w_0, \dots, w_{g-t})$  de  $W$ . Toutefois, il s'avère que tous les énoncés qui vont suivre jusqu'à la fin du § 3.4 restent vrais avec une base quelconque de  $W$ .

**3.2. Estimations ultramétriques d'un coefficient de Taylor.** Dans tout ce paragraphe,  $v$  désigne une place ultramétrique du corps de nombres  $K$  et  $p$  la caractéristique résiduelle de  $v$ .

Avant d'énoncer un résultat général, oublions momentanément le groupe  $G_0$  et les polynômes  $(P_{\lambda_0})$  et considérons un polynôme  $P = \sum p_{\lambda} \mathbf{X}^{\lambda}$  de  $K_v[\mathbf{P}^{N_1} \times \dots \times \mathbf{P}^{N_n}]$ . Soit  $\ell$  un entier naturel. Les propos qui suivent ne feront pas intervenir dans un premier temps le fait que  $V$  est une sous-algèbre de Lie de  $t_G$ . À partir des équations différentielles vérifiées par les composantes de l'exponentielle de  $G(\mathbf{C}_v)$ , il est facile de montrer qu'il existe une famille finie  $\mathcal{F}$  de nombres algébriques, qui ne dépend que de  $(G, \Phi)$ , telle que le coefficient de Taylor

$$(37) \quad \frac{\mathcal{D}_{w_1}^{\tau_1} \dots \mathcal{D}_{w_{g-t}}^{\tau_{g-t}}}{\tau_1! \dots \tau_{g-t}!} (P \circ \exp_v(z))|_{z=0}$$

\*Voir le lemme 3.22 et en particulier le réel  $\kappa$ .

†Je ne sais pas si cette éventualité est possible.



pour  $(\tau_1, \dots, \tau_{g-t}) \in \mathbf{N}^{\dim V}$  de longueur  $\ell$ , soit majoré par

$$(38) \quad p^{\frac{\ell}{p-1}} |\mathcal{F}|^{\ell + \deg P} \max \{ |p\lambda|_v \} \prod_{i=1}^{g-t} \|w_i\|_v^{\tau_i} .$$

Il est donc exclu *a priori* d'utiliser cette borne en toutes les places ultramétriques de  $K$  puisque la somme des  $\log(p)/p$  diverge. Nous allons voir que lorsque  $V$  est une sous-algèbre de Lie de  $t_G$  et si les dérivées (37) d'ordres  $< \ell$  sont nulles, c'est précisément cette obstruction qui disparaît.

3.2.1. À cette fin, nous utiliserons la notion de *taille d'un sous-schéma formel lisse* telle qu'elle a été définie par J.-B. Bost au § 3.1 de [9]. Rappelons qu'au § 1.1, nous avons introduit un modèle lisse  $\mathcal{G} \rightarrow \text{Spec } \mathcal{O}_k[\frac{1}{m}]$  de  $G$ . De la sorte, si  $v$  ne divise pas  $m$ , nous pouvons considérer le complété formel  $\widehat{\mathcal{G}}_v$  de  $\mathcal{G} \times \text{Spec}(\mathcal{O}_v)$  à l'origine ( $\mathcal{O}_v$  étant l'anneau de valuation du complété  $K_v$ ). C'est un groupe formel lisse sur  $\text{Spec}(\mathcal{O}_v)$  et le choix de coordonnées locales étales au voisinage de l'origine fournit un isomorphisme de groupes formels (sur  $\mathcal{O}_v$ )

$$\widehat{\mathcal{G}}_v \simeq \widehat{\mathbf{A}}_{\mathcal{O}_v}^g := \text{Specf } \mathcal{O}_v[[X_1, \dots, X_g]] .$$

Si  $\mathfrak{X}$  est un sous-schéma formel lisse de  $\widehat{G}_{K_v} \simeq \widehat{\mathcal{G}}_v \widehat{\otimes} \text{Spec } K_v$ , on dispose d'un nombre réel  $R_{\mathcal{G},v}(\mathfrak{X}) \in [0, 1]$ , appelé *taille de  $\mathfrak{X}$  relativement au modèle  $\widehat{\mathcal{G}}_v$  de  $\widehat{G}_{K_v}$* , défini de la manière suivante. Considérons l'image de  $\mathfrak{X}$  (notée encore  $\mathfrak{X}$ ) dans  $\widehat{\mathbf{A}}_{K_v}^g$  via le choix de coordonnées précédent. Le groupe  $\text{Aut}(\widehat{\mathbf{A}}_{K_v}^g)$  des automorphismes de  $\widehat{\mathbf{A}}_{K_v}^g$  s'identifie à l'ensemble des  $g$ -uplets de séries formelles  $f = (f_1, \dots, f_g) \in K_v[[X_1, \dots, X_g]]^g$  tels que  $f(0) = 0$  et la matrice jacobienne  $D_0 f = (\partial f_i / \partial x_j(0))_{i,j}$  soit inversible. Pour  $\varphi = \sum_{\mathbf{n} \in \mathbf{N}^g} a_{\mathbf{n}} \mathbf{X}^{\mathbf{n}} \in K_v[[\mathbf{X}]]$  et  $r > 0$ , on note

$$\|\varphi\|_r := \sup_{\mathbf{n} \in \mathbf{N}^g} |a_{\mathbf{n}}|_v r^{|\mathbf{n}|} \in [0, +\infty]$$

et

$$G_{\omega}(r) := \left\{ f \in \text{Aut}(\widehat{\mathbf{A}}_{K_v}^g) ; D_0 f \in \text{GL}_g(\mathcal{O}_v) \text{ et } \|f\|_r := \max_{1 \leq i \leq g} \|f_i\|_r \leq r \right\} .$$

Alors, par définition, la taille de  $\mathfrak{X}$  est

$$R_{\mathcal{G},v}(\mathfrak{X}) := \sup \left\{ r > 0 ; \exists f \in G_{\omega}(r) ; f^*(\mathfrak{X}) = \widehat{\mathbf{A}}_{K_v}^d \times \{0\} \right\}$$

où  $d := \dim \mathfrak{X}$ , et  $R_{\mathcal{G},v}(\mathfrak{X}) = 0$  si l'ensemble précédent est vide. Dans cette écriture,  $f^*(\mathfrak{X})$  désigne l'image inverse de  $\mathfrak{X}$  par  $f$ . Le nombre  $R_{\mathcal{G},v}(\mathfrak{X})$  est strictement positif lorsque  $\mathfrak{X}$  est analytique. Il permet de mesurer la « taille »  $v$ -adique (minimale) d'un système de paramètres locaux sur  $\mathfrak{X}$  exprimés en fonction des paramètres  $X_1, \dots, X_g$  fixés sur  $\widehat{\mathcal{G}}_v$ , comme nous allons le voir dans un instant avec le lemme 3.4. Signalons qu'il est possible de généraliser immédiatement cette définition à un schéma  $\mathcal{G}$  sur un ouvert  $U$  de  $\text{Spec } \mathcal{O}_k$  (pas nécessairement un schéma en groupes) auquel on adjoint un point de  $\mathcal{G}(U)$ . Observons également que si  $\mathfrak{X}$  provient d'un sous-schéma (en groupes) de  $\mathcal{G} \times \text{Spec } \mathcal{O}_v$ , lisse le long de l'origine, alors  $R_{\mathcal{G},v}(\mathfrak{X}) = 1$ . Lorsque cette dernière condition de lissité n'est pas remplie, nous disposons néanmoins d'une estimation un peu meilleure que seulement

$R_{\mathcal{G},v}(\mathfrak{X}) \geq 0$ . Supposons que  $\mathfrak{X}$  est le complété formel le long de l'origine d'un sous-groupe algébrique de  $G_{K_v}$ . Rappelons que le groupe formel  $\widehat{G}_v$  possède une exponentielle formelle qui, en termes des coordonnées  $X_i$ , s'écrit comme un  $g$ -uplet  $\mathbf{E} = (E_1(\mathbf{X}), \dots, E_g(\mathbf{X}))$  de séries formelles de  $K_v[[\mathbf{X}]]$ , telles que les coefficients de  $\mathbf{X}^{\mathbf{n}}$  ( $\mathbf{n} \in \mathbf{N}^g$ ) de  $E_1, \dots, E_g$  sont de la forme  $\alpha_{\mathbf{n}}/\mathbf{n}!$  avec  $\alpha_{\mathbf{n}} \in \mathcal{O}_v$ . On peut normaliser cette exponentielle de sorte que la différentielle à l'origine  $D_0\mathbf{E}$  soit l'identité. Soit  $r_p = |p|_v^{1/(p-1)}$  (déjà introduit p. 10). Le  $g$ -uplet  $\mathbf{E}$  est un élément de  $G_\omega(r_p)$  puisque  $|\mathbf{n}!|_v \geq r_p^{|\mathbf{n}|-1}$ . Au moyen de cette application exponentielle, il est alors aisé de construire un automorphisme  $f \in G_\omega(r_p)$  tel que  $f^*(\mathfrak{X}) = \widehat{\mathbf{A}}_{K_v}^d \times \{0\}$ . Ce qui entraîne la minoration  $R_{\mathcal{G},v}(\mathfrak{X}) \geq r_p$  (pour toute place  $v \nmid m$ ). On notera qu'à l'instar de la majoration (38) du coefficient de Taylor (37), cette estimation n'est vraiment utile qu'en un nombre fini de places  $v$  puisque le produit infini  $\prod_p r_p$  diverge.

Revenons au cas d'un sous-schéma formel lisse  $\mathfrak{X}$  quelconque de  $\widehat{G}_{K_v}$ . L'espace tangent à l'origine  $t_{\mathfrak{X}}$  de  $\mathfrak{X}$  est muni d'une structure entière en considérant le module

$$t_{\mathfrak{X}} \cap t_{\mathcal{G}_v} = \{z \in t_{\mathfrak{X}} \subseteq t_G(K_v); \|z\|_v \leq 1\}$$

sur l'anneau  $\mathcal{O}_v$ , ce qui confère à l'espace dual  $t_{\mathfrak{X}}^\vee$  puis à l'espace symétrique  $S^\ell(t_{\mathfrak{X}}^\vee)$  de degré  $\ell \in \mathbf{N}$  une norme notée  $\|\cdot\|_{S^\ell(t_{\mathfrak{X}}^\vee)}$ .

Ces définitions conduisent alors au lemme suivant.

**Lemme 3.4** (lemme 3.3 de [9]). *Soit  $\ell \in \mathbf{N}$ ,  $\Omega$  un sous-schéma ouvert de  $\mathcal{G}_v$  contenant la section nulle et  $s$  une fonction régulière sur  $\Omega$  telle que  $s_{K_v}$  s'annule à l'ordre  $\ell - 1$  le long de  $\mathfrak{X}$  en la section nulle de  $G_{K_v}$ . Alors le jet  $j_{\mathfrak{X}}^\ell s$  d'ordre  $\ell$  le long de  $\mathfrak{X}$  — vu comme élément de  $S^\ell(t_{\mathfrak{X},0})^\vee$  (\*) — vérifie*

$$(39) \quad \|j_{\mathfrak{X}}^\ell s\|_{S^\ell(t_{\mathfrak{X},0})^\vee} \leq R_{\mathcal{G},v}(\mathfrak{X})^{-\ell}.$$

*Démonstration.* Notons comme précédemment  $d = \dim \mathfrak{X}$  et soit  $0 < r \leq R_{\mathcal{G},v}(\mathfrak{X})$  et  $f \in G_\omega(r)$  tels que  $f^*(\mathfrak{X}) = \widehat{\mathbf{A}}_{K_v}^d \times \{0\}$ . L'élément  $f$  s'écrit  $(f_1, \dots, f_g)$  où  $f_i = \sum a_{\mathbf{n}}^{(i)} \mathbf{X}^{\mathbf{n}}$  avec  $|a_{\mathbf{n}}^{(i)}|_v \leq r^{1-|\mathbf{n}|} \leq r^{-|\mathbf{n}|}$ . Par définition même,  $(f_1, \dots, f_d)$  (resp.  $(f_1, \dots, f_g)$ ) forme un système de coordonnées locales sur  $\mathfrak{X}$  (resp.  $\widehat{G}_{K_v}$ ) et l'hypothèse faite sur  $s$  signifie que

$$(40) \quad s|_{\mathfrak{X}} \in (f_1, \dots, f_d)^\ell$$

où  $(f_1, \dots, f_d)$  est l'idéal maximal de  $K_v[[f_1, \dots, f_d]]$ . Or, puisque  $D_0 f$  appartient à  $\mathrm{GL}_g(\mathcal{O}_v)$ , l'inverse de  $f$  appartient également à  $G_\omega(r)$ , les  $X_i$  ( $1 \leq i \leq g$ ) s'expriment en fonction de  $f_1, \dots, f_g$  et les  $\mathbf{n}^{\text{èmes}}$  coefficients sont majorés par  $r^{-|\mathbf{n}|}$ . En substituant ces expressions dans  $s = \sum a_{\mathbf{n}} \mathbf{X}^{\mathbf{n}}$  ( $a_{\mathbf{n}} \in \mathcal{O}_v$  par hypothèse), nous déduisons que  $s$  s'écrit  $\sum_{\mathbf{n} \in \mathbf{N}^g} b_{\mathbf{n}} f^{\mathbf{n}}$  avec  $|b_{\mathbf{n}}|_v \leq r^{-|\mathbf{n}|}$  et il en est donc de même pour  $s|_{\mathfrak{X}} = s(f_1, \dots, f_d, 0, \dots, 0)$ . En comparant avec (40), on montre ainsi le lemme 3.4.  $\square$

Observons par ailleurs que si  $G$  est une extension de groupes algébriques

$$0 \rightarrow G_1 \rightarrow G \rightarrow G_2 \rightarrow 0$$

---

\*C'est-à-dire, si l'on écrit  $s(x) = F(z).s_0(x)$  où  $x = \exp_v(z)$  et  $F$  analytique dans un voisinage de 0 de  $t_G(\mathbf{C}_v)$ , on a  $j_{\mathfrak{X}}^\ell s = \mathrm{jet}_{t_{\mathfrak{X}}}^\ell F(0).s_0$ .

et si  $\mathcal{G}_i$ ,  $i = 1, 2$ , est un schéma en groupes lisse sur  $\text{Spec } \mathcal{O}_k[1/m]$  de fibre générique  $G_i$ , alors, pour toute place ultramétrique  $v$  de  $K$  en dehors d'un nombre fini ne dépendant que de  $(G, k)$  et pour tout sous-schéma formel  $\mathfrak{X} = \mathfrak{X}_1 \times \mathfrak{X}_2$  de  $\widehat{G}_{K_v}$  (avec  $\mathfrak{X}_i \subseteq \widehat{G}_{i, K_v}$ ), on a

$$(41) \quad \min \{R_{\mathcal{G}_1, v}(\mathfrak{X}_1), R_{\mathcal{G}_2, v}(\mathfrak{X}_2)\} \leq R_{\mathcal{G}, v}(\mathfrak{X}) \leq \max \{R_{\mathcal{G}_1, v}(\mathfrak{X}_1), R_{\mathcal{G}_2, v}(\mathfrak{X}_2)\}.$$

Soit  $\widehat{H}_v$  le complété formel à l'origine du schéma  $H \times \text{Spec } K_v$ . C'est un sous-schéma formel lisse de  $\widehat{G}_{K_v}$ . En appliquant le lemme à la section de  $\mathcal{O}_{\widehat{G}_v}$  définie par  $(P/\max\{|p_\lambda|_v\}) \circ \exp_v$  au voisinage de 0 et  $\mathfrak{X} = \widehat{H}_v$ , nous obtenons le

**Corollaire 3.5.** *Soit  $P, \ell$  les données considérées au début de cette section. Supposons que les dérivées  $\mathcal{D}_{\mathbf{w}}^\tau(P \circ \exp_v)(0)$  soient toutes nulles lorsque  $\tau \in \mathbf{N}^{\dim V}$  vérifie  $|\tau| < \ell$ . Supposons également que  $v$  ne divise pas  $m$ . Alors la valeur absolue  $v$ -adique du coefficient (37) (avec  $|\tau| = \ell$ ) est majorée par*

$$R_{\mathcal{G}, v}(\widehat{H}_v)^{-\ell} \max_{\lambda} \{|p_\lambda|_v\} \prod_{i=1}^{g-t} \|w_i\|_v^{\tau_i}.$$

La caractéristique de ces majorants est qu'ils ne dépendent pas trop directement de la valeur absolue  $v$ -adique de  $\ell!$  comme cela était le cas lorsque nous avons « chassé les dénominateurs » assez brutalement dans (38). Toutefois, lorsque  $\mathfrak{X}$  est quelconque comme dans le lemme 3.4, ces estimations locales fines (pour  $v \nmid m$ ) ne sont pas la panacée car la somme infinie

$$(42) \quad \sum_{\substack{v \nmid m \\ v \text{ ultramétrique}}} \log R_{\mathcal{G}, v}(\mathfrak{X})$$

peut diverger. En fait, le théorème 3.4 de [9] assure précisément que le somme infinie (42) converge si et seulement si  $\mathfrak{X}$  provient d'une sous-variété algébrique de  $G$  (i.e.  $t_{\mathfrak{X}}$  est l'espace tangent d'une telle variété\*), pourvu que  $\mathfrak{X}$  satisfasse au préalable aux conditions de Liouville et d'analyticité exigées dans les points ii) et iii) du théorème. Ces dernières conditions sont naturellement remplies dans le contexte des formes linéaires de logarithmes où  $\mathfrak{X} = \widehat{\exp}_v(V)$ . C'est pourquoi l'hypothèse faite sur  $V$  dans ce texte — espace tangent d'un sous-groupe algébrique de  $G$  — est la seule condition qui convienne pour utiliser le corollaire 3.5 en toutes les places ultramétriques de  $K$ , en dehors d'un ensemble fini qui ne dépend que de  $G$  et de son modèle entier. Nous sommes dans le cas de figure idéal pour avoir un dénominateur optimal des nombres algébriques considérés. Désignons par  $\chi_H$  la somme finie

$$(43) \quad \chi_H := \frac{1}{[K : \mathbf{Q}]} \sum_{\substack{v \nmid m \\ v \text{ ultramétrique}}} \log R_{\mathcal{G}, v}(\widehat{H}_v)^{-1} \in \mathbf{R}^+.$$

Nous disposons d'une estimation *uniforme* de  $\chi_H$  qui nous a été communiquée par J.-B. Bost.

---

\*Et, dans ce cas, les tailles  $R_{\mathcal{G}, v}(\mathfrak{X})$  sont presque toutes égales à 1, la somme (42) est une somme finie.

**Lemme 3.6.** *Il existe une constante  $c_{23} \geq 1$  ne dépendant que de  $G$  (en particulier indépendante du corps  $K$  et du groupe  $H$ ) telle que  $\chi_H \leq c_{23}$ .*

Ce résultat est pour l'essentiel une conséquence du théorème suivant de M. Raynaud.

**Théorème 3.7** (corollaire du théorème 4, § 7.5, de [7], p. 187). *Soit  $K$  un corps de nombres et  $A_1 \subseteq A_2$  deux variétés abéliennes sur  $K$ . Soit  $\mathcal{A}_1, \mathcal{A}_2$  leurs modèles de Néron respectifs sur  $\mathcal{O}_K$ . Soit  $v$  une place finie de  $K$ , de caractéristique résiduelle  $p$  et d'indice de ramification  $e(K_v | \mathbf{Q}_p)$  (\*). Si  $e(K_v | \mathbf{Q}_p) < p - 1$  et si  $\mathcal{A}_2$  a bonne réduction en  $v$  alors  $\mathcal{A}_1$  a bonne réduction en  $v$  et l'unique morphisme  $\mathcal{A}_1 \rightarrow \mathcal{A}_2$  issu de la propriété de modèle de Néron de  $\mathcal{A}_2$  est une immersion fermée.*

*Démonstration du lemme 3.6.* Le groupe algébrique  $G$  est connexe par hypothèse. D'après le théorème de décomposition de Chevalley, et après une éventuelle extension finie du corps de nombres de définition de  $G$ , il existe des entiers naturels  $d_0$  et  $d_1$  et une variété abélienne  $A$  tels que  $G$  soit une extension du groupe linéaire  $\mathbb{G}_a^{d_0} \times \mathbb{G}_m^{d_1}$  par  $A$ . Soit  $\mathcal{G}_1$  (resp.  $\mathcal{G}_2$ ) le schéma en groupes  $\mathbb{G}_{a, \mathcal{O}_K}^{d_0} \times \mathbb{G}_{m, \mathcal{O}_K}^{d_1}$  (resp. le modèle de Néron de  $A$ ). Le sous-groupe  $H$  de  $G$  est alors une extension d'un sous-groupe algébrique  $\mathbb{T}$  de  $\mathbb{G}_a^{d_0} \times \mathbb{G}_m^{d_1}$  par une sous-variété abélienne  $B$  de  $A$ . D'après la propriété (41) appliquée à  $\mathfrak{X}_1 := \widehat{\mathbb{T}}_{K_v}$  et  $\mathfrak{X}_2 := \widehat{B}_{K_v}$  (les complétés formels considérés ici sont, comme précédemment, relatifs à l'origine) et pour toute place ultramétrique  $v$  de  $K$  en dehors d'une nombre fini ne dépendant que de  $G$ , on a  $R_{\mathcal{G}, v}(\widehat{H}_v) \geq \min \{R_{\mathcal{G}_1, v}(\widehat{\mathbb{T}}_{K_v}), R_{\mathcal{G}_2, v}(\widehat{B}_{K_v})\}$ . Comme  $\mathbb{T}_{K_v}$  est un sous-groupe connexe de  $\mathbb{G}_{a, K_v}^{d_0} \times \mathbb{G}_{m, K_v}^{d_1}$ , il se relève en un sous-schéma en groupes lisse de  $\mathcal{G}_1 \times \text{Spec } \mathcal{O}_v$  et sa taille vaut alors 1. Par conséquent  $R_{\mathcal{G}, v}(\widehat{H}_v) \geq R_{\mathcal{G}_2, v}(\widehat{B}_{K_v})$  et l'on est ramené au cas des variétés abéliennes. Soit  $\mathcal{B}$  le modèle de Néron de  $B_K$  sur  $\mathcal{O}_K$ . En vertu du théorème 3.7 et en dehors des places  $v$  dont la caractéristique résiduelle est inférieure à  $e(K_v | \mathbf{Q}_p) + 2 \leq [K_v : \mathbf{Q}_p] + 2$  ou celles de mauvaise réduction de  $\mathcal{G}_2$ , le schéma  $\mathcal{B} \times \text{Spec } \mathcal{O}_v$  est un sous-schéma abélien de  $\mathcal{G}_2 \times \text{Spec } \mathcal{O}_v$ . Pour ces places, on a donc  $R_{\mathcal{G}_2, v}(\widehat{B}_{K_v}) = 1$ . En les autres places, on utilise la minoration « triviale »  $R_{\mathcal{G}_2, v}(\widehat{B}_{K_v}) \geq |p|_v^{1/(p-1)}$  évoquée un peu plus haut et l'existence de la constante  $c_{23}$  s'ensuit.  $\square$

**Remarque 3.8.** En réalité, il n'est pas nécessaire d'avoir une estimation aussi fine de  $\chi_H$  pour démontrer les théorèmes 1.4 et 1.5. Lorsque nous laissons  $\chi_H$  « indéterminé » (ce que nous ferons dans la suite), nous constatons qu'il apparaît dans le facteur  $\max \{1, h(V)\}$  (intervenant dans le paramètre  $\mathfrak{a}$ ), qui devient alors  $\max \{1, h(V), \chi_H\}$ . Autrement dit, il suffirait de montrer l'existence d'une constante  $c_{24}$  telle que  $\chi_H \leq c_{24} \max \{1, h(V)\}$  pour obtenir *exactement* les mêmes énoncés que les théorèmes 1.4 et 1.5. Et cela est possible de manière élémentaire sans avoir recours au résultat de M. Raynaud. La démarche consiste à se ramener comme ci-dessus au cas abélien puis à comparer la structure entière sur  $t_{\mathcal{B}}$  donnée par le modèle de Néron  $\mathcal{B}$  de  $B$  et celle donnée par le module saturé  $t_{\mathcal{B}} \cap t_{\mathcal{G}_2}$ , à partir duquel se

\*De la sorte, si  $\varpi$  est une uniformisante de l'anneau de valuation  $\mathcal{O}_v \subseteq K_v$ , l'idéal engendré par  $p$  est  $(\varpi)^{e(K_v | \mathbf{Q}_p)}$ .

calcule la norme des jets le long de  $t_B$ . Le calcul du quotient  $(t_B \cap t_{G_2})/t_B$  (voir, par exemple, p. 33 de [8]) fournit alors une constante  $c_{25}$  telle que  $\chi_H \leq c_{25} \max\{1, \log \deg B\}$  où le degré est relatif à un plongement (quelconque) de  $A$  dans un espace projectif. Il ne reste plus qu'à observer que  $\log \deg B$  est du même ordre de grandeur que la hauteur de  $t_B$  (voir, par exemple, le lemme 4.7 de [22]), elle-même majorée par  $c_{26} \max\{1, h(V)\}$  pour une certaine constante  $c_{26}$ .

3.2.2. Avant de passer aux estimations archimédiennes, nous aurons besoin d'une conséquence (qui en est aussi une généralisation en quelque sorte) du corollaire 3.5. Soit maintenant  $P$  un polynôme de l'espace  $E$ , considéré au § 2.3 et  $F := P \circ \exp_{(G_0 \times G)(\mathbf{C}_v)}$  l'application associée à  $P$  en la place  $v$ , définie par (16). Soit  $\ell \in \mathbf{N}$ ,  $z$  un vecteur de  $\mathcal{T}_v$  d'exponentielle  $v(K)$ -rationnelle et  $z_0$  un élément de  $t_{G_0, v}(K) \simeq v(K)$ . Dans l'énoncé qui va suivre, nous supposons que  $F$  s'annule à l'ordre  $\ell - 1$  le long de  $W$  au point  $(z_0, z)$ , ou, en d'autres termes:

$$(44) \quad \forall \mathbf{i} = (i_0, \dots, i_{g-t}) \in \mathbf{N}^{\dim W} \quad |\mathbf{i}| \leq \ell - 1, \quad \mathcal{D}_{\mathbf{w}}^{\mathbf{i}} F(z_0, z) = 0$$

(si  $\ell = 0$  cette condition est vide). Pour chaque entier  $i \in \{1, \dots, n\}$ , nous fixons un entier  $\varepsilon_i$  de l'ensemble  $\{0, \dots, N_i\}$  pour lequel  $\theta_{v, i, \varepsilon_i}(z) \neq 0$ .

**Lemme 3.9.** *Dans ces conditions, le coefficient de Taylor tordu*

$$(45) \quad \frac{1}{\prod_{i=1}^n \theta_{v, i, \varepsilon_i}(z)^{D_i}} \frac{\mathcal{D}_{w_0}^{\tau_0} \dots \mathcal{D}_{w_{g-t}}^{\tau_{g-t}} F(z_0, z),}{\tau_0! \dots \tau_{g-t}!}$$

où l'uplet  $(\tau_0, \dots, \tau_{g-t})$  est de longueur  $\ell$ , appartient à  $v(K)$ .

*Démonstration.* Nous allons utiliser les formules de translations sur le groupe algébrique  $G(K_v)$  pour nous ramener en  $0^*$ . Soit  $\tilde{Q}$  le polynôme défini par

$$(46) \quad \tilde{Q}(\mathbf{X}_1, \dots, \mathbf{X}_n) = \sum_{\lambda} p_{\lambda} \frac{P_{\lambda_0}^{(\tau_0)}(z_0)}{\tau_0!} \prod_{i=1}^n A^{(i)}(\Psi_{v, i, \varepsilon_i}(z), \mathbf{X}_i)^{\lambda_i}$$

où  $(A^{(i)})_{i=1 \dots n}$  sont les uplets de polynômes représentant les formules d'additions sur  $G_{K_v}$  au voisinage de  $x = \exp_v(z)$  (voir § 2.1). La formule de Leibniz et l'hypothèse (44) montrent que le coefficient (45) égale

$$(47) \quad \frac{\mathcal{D}_{w_0}^{\tau_0} \dots \mathcal{D}_{w_{g-t}}^{\tau_{g-t}}}{\tau_0! \dots \tau_{g-t}!} \left( \frac{F(z_0 + z'_0, z + z')}{\prod_{i=1}^n \theta_{v, i, \varepsilon_i}(z + z')^{D_i}} \right)_{|(z'_0, z')=(0,0)}$$

Or, par définition,

$$\frac{\theta_{v, i, j}(z + z')}{\theta_{v, i, \varepsilon_i}(z + z')} = \frac{A_j^{(i)}(\Psi_{v, i, \varepsilon_i}(z), \Theta_{v, i}(z'))}{A_{\varepsilon_i}^{(i)}(\Psi_{v, i, \varepsilon_i}(z), \Theta_{v, i}(z'))}$$

---

\*Il s'agit de « l'astuce d'Anderson-Baker-Coates » (voir, par exemple, la preuve du lemme 13 de [21]).

pour  $z'$  proche de 0, donc

$$\frac{F(z_0 + z'_0, z + z')}{\prod_{i=1}^n \theta_{v,i,\varepsilon_i}(z + z')^{D_i}} = \left( \sum_{\lambda} p_{\lambda} P_{\lambda_0}(z_0 + z'_0) \prod_{i=1}^n A^{(i)}(\Psi_{v,i,\varepsilon_i}(z), \Theta_{v,i}(z'))^{\lambda_i} \right) \times \frac{1}{\prod_{i=1}^n A_{\varepsilon_i}^{(i)}(\Psi_{v,i,\varepsilon_i}(z), \Theta_{v,i}(z'))^{D_i}} .$$

En dérivant par rapport à  $z'_0$ , on a

$$\frac{\mathcal{D}_{w_0}^{\tau_0}}{\tau_0!} \left( \frac{F(z_0 + z'_0, z + z')}{\prod_{i=1}^n \theta_{v,i,\varepsilon_i}(z + z')^{D_i}} \right) \Big|_{z'_0=0} = \frac{F_{\tilde{Q},v}(z')}{\prod_{i=1}^n A_{\varepsilon_i}^{(i)}(\Psi_{v,i,\varepsilon_i}(z), \Theta_{v,i}(z'))^{D_i}} .$$

Cette égalité implique en particulier que les dérivées  $\mathcal{D}_{\mathbf{w}}^{\mathbf{i}} F_{\tilde{Q},v}(0)$  pour  $|\mathbf{i}| < \ell - \tau_0$  sont toutes nulles. En appliquant alors l'opérateur

$$\mathcal{D}_{w_1}^{\tau_1} \cdots \mathcal{D}_{w_{g-t}}^{\tau_{g-t}} / (\tau_1! \cdots \tau_{g-t}!)$$

aux deux membres puis, à nouveau, la formule de Leibniz pour le second, on déduit l'égalité

$$(48) \quad \frac{1}{\prod_{i=1}^n \theta_{v,i,\varepsilon_i}(z)^{D_i}} \frac{\mathcal{D}_{w_0}^{\tau_0} \cdots \mathcal{D}_{w_{g-t}}^{\tau_{g-t}}}{\tau_0! \cdots \tau_{g-t}!} F_{P,v}(z_0, z) = \frac{1}{\prod_{i=1}^n (A_{\varepsilon_i}^{(i)}(\Psi_{v,i,\varepsilon_i}(z), (1:0:\cdots:0)))^{D_i}} \frac{\mathcal{D}_{w_1}^{\tau_1} \cdots \mathcal{D}_{w_{g-t}}^{\tau_{g-t}}}{\tau_1! \cdots \tau_{g-t}!} F_{\tilde{Q},v}(0) .$$

Maintenant, par choix de  $z$ , chacune des coordonnées de  $\Psi_{v,i,\varepsilon_i}(z)$  appartient à  $v(K)$ , ainsi bien sûr que les coefficients des polynômes  $A_{\varepsilon_i}^{(i)}$  et des polynômes des formules différentielles vérifiées par les  $\theta_{v,i,j}$  en 0 (rappelons que  $\Theta_{v,i}(0) = (1, 0, \dots, 0)$ ). Par suite, le membre de droite de (48) est clairement un élément de  $v(K)$ , ce qui démontre le lemme.  $\square$

**Remarque 3.10.** L'assertion du lemme 3.9 reste vraie lorsque  $v$  est une place archimédienne (avec la même preuve!).

En chemin, nous avons montré que le polynôme  $\tilde{Q}$  satisfaisait aux hypothèses du corollaire 3.5. De l'égalité (48) et d'une estimation immédiate des coefficients de  $\tilde{Q}$  découle alors la

**Proposition 3.11.** *Avec les notations et hypothèses ci-dessus et si  $v \nmid m$ , la valeur absolue  $v$ -adique du coefficient (45) est majorée par*

$$(49) \quad \max \{ |p_{\lambda}|_v \} \prod_{i=1}^n \max_{0 \leq j \leq N_i} \left\{ \left| \frac{\theta_{v,i,j}}{\theta_{v,i,\varepsilon_i}}(z) \right|_v \right\}^{c_{14} D_i} \max_{\lambda_0} \left\{ \left| \frac{1}{\tau_0!} P_{\lambda_0}^{(\tau_0)}(z_0) \right|_v \right\} \times \prod_{i=1}^{g-t} \|w_i\|_v^{\tau_i} \times R_{\mathcal{G},v}(\widehat{H}_v)^{-\ell} \times \prod_{i=1}^n \frac{1}{|A_{\varepsilon_i}^{(i)}(\Psi_{v,i,\varepsilon_i}(z), (1, 0, \dots, 0))|_v^{D_i}} .$$

Si  $v \mid m$  la majoration ci-dessus reste vraie en remplaçant  $R_{\mathcal{G},v}(\widehat{H}_v)^{-\ell}$  par  $c_{27}^{\ell+D_1+\cdots+D_n}$  où  $c_{27}$  est une constante  $\geq 1$ .

Naturellement, la dernière assertion de cette proposition résulte de la majoration « naïve » (38) et non du corollaire 3.5. Les équivalents de ces estimations pour les places archimédiennes sont plus rudimentaires et font l'objet du paragraphe suivant.

**3.3. Estimations archimédiennes de coefficients de Taylor.** Dans tout ce paragraphe,  $v$  est une place archimédienne de  $K$ . Nous voulons obtenir ici une majoration du coefficient tordu (45) en la place  $v$ . Commençons tout d'abord par noter le

**Lemme 3.12.** *Il existe une constante  $c_{28}$  telle que soit vérifiée la propriété suivante. Soit  $\lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_n) \in \mathbf{N}^{N_1+1} \times \dots \times \mathbf{N}^{N_n+1}$ ,  $z = (z_1, \dots, z_n)$  un vecteur de  $t_G(\mathbf{C}_v)$ ,  $\mathbf{f} = (f_1, \dots, f_g)$  une base de  $t_G(\mathbf{C}_v)$  et  $\tau = (\tau_1, \dots, \tau_g) \in \mathbf{N}^g$ . Pour chaque entier  $i \in \{1, \dots, n\}$ , considérons  $\varepsilon_i \in \{0, \dots, N_i\}$  un entier (lié à  $z_i$ ) pour lequel  $\theta_{v,i,\varepsilon_i}(z) \neq 0$ . Alors la valeur absolue du coefficient de Taylor*

$$\frac{D_{\mathbf{f}}^{\tau}}{\tau!} \left( \prod_{i=1}^n \Psi_{v,i,\varepsilon_i}^{\lambda_i} \right) (z)$$

est majorée par

$$c_{28}^{|\tau|+|\lambda|} \left( \prod_{j=1}^g \|f_j\|_v^{\tau_j} \right) \prod_{i=1}^n \max_{0 \leq j \leq N_i} \left\{ \left| \frac{\theta_{v,i,j}(z)}{\theta_{v,i,\varepsilon_i}} \right|_v \right\}^{c_{28}|\lambda_i|}.$$

Ce résultat quoique technique ne pose aucune difficulté particulière lorsque l'on se rappelle que pour chaque  $i \in \{1, \dots, n\}$  l'anneau

$$k[\Psi_{v,i,\varepsilon_i}] := k[(\theta_{v,i,j}/\theta_{v,i,\varepsilon_i})_{0 \leq j \leq N_i}]$$

est stable par dérivation le long d'un vecteur de  $t_G(k)$ . Il faut cependant observer que la constante  $c_{28}$  est bien indépendante de la base  $\mathbf{f}$  choisie. Mais cela se voit immédiatement en écrivant les vecteurs  $f_j/\|f_j\|_v$  dans une base orthonormée quelconque de  $t_G(\mathbf{C}_v)$  (qui, elle, ne dépend que  $G$  et de la norme sur  $t_G(\mathbf{C}_v)$ ) et en majorant leurs composantes par 1.

Maintenant, considérons une situation semblable à celle du dernier énoncé du paragraphe précédent. Étant donné un polynôme  $P \in E$ , un entier  $\ell \in \mathbf{N}$  et un vecteur  $(z_0, z) \in t_{G_0 \times G}(\mathbf{C}_v)$  d'exponentielle  $K$ -rationnelle, il s'agit, sous l'hypothèse d'annulation (44) de donner une borne du coefficient de Taylor tordu (45). La réponse se trouve aussitôt dans l'égalité (48) (qui repose sur les formules d'additions « explicites » de  $G$ ) et le lemme 3.12, ce qui conduit à la

**Proposition 3.13.** *Il existe une constante  $c_{29} \geq 1$  ayant la propriété suivante. Pour toute place archimédienne  $v$  et avec les notations et hypothèses ci-dessus, la valeur absolue  $v$ -adique du nombre (45) ( $|\tau| = \ell$ ) est majorée par*

$$c_{29}^{T+\log D_0+D_1+\dots+D_n} \left( \prod_{i=1}^{g-t} \|w_i\|_v^{\tau_i} \right) \max_{\lambda} \{ |p_{\lambda}|_v \} \max_{\lambda_0} \left\{ \left| \frac{1}{\tau_0!} P_{\lambda_0}^{(\tau_0)}(z_0) \right|_v \right\} \\ \times \prod_{i=1}^n \frac{1}{|A_{\varepsilon_i}^{(i)}(\Psi_{v,i,\varepsilon_i}(z), (1 : 0 : \dots : 0))|_v^{D_i}} \prod_{i=1}^n \max_{0 \leq j \leq N_i} \left\{ \left| \frac{\theta_{v,i,j}(z)}{\theta_{v,i,\varepsilon_i}} \right|_v \right\}^{c_{29}D_i}.$$

**Remarque 3.14.** Le logarithme de  $D_0$  qui apparaît en exposant de  $c_{29}$  provient simplement de la dimension de  $E$  (qui vaut  $H(G_0 \times G; D_0, \dots, D_n)$ ).

**3.4. Construction du polynôme auxiliaire.** Soit  $E$  l'espace vectoriel quotient  $(k[\mathbf{P}]/I(G_0 \times G))_{\mathbf{D}}$  introduit au § 2.3 et  $F$  le sous-espace de  $\overline{\mathbf{Q}}^{\dim E}$  défini par

$$(50) \quad F := \left\{ (p_{\lambda})_{\lambda} \in \overline{\mathbf{Q}}^{\dim E}; \forall (s, \mathbf{t}) \in \Upsilon, \sum_{\lambda} p_{\lambda} \mathcal{D}_{\mathbf{w}}^{\mathbf{t}}(\Theta^{\lambda})(s(1, u)) = 0 \right\}$$

où  $\Theta^{\lambda}$  est une notation abrégée pour

$$(51) \quad P_{\lambda_0} \prod_{i=1}^n \Theta_{v_0, i}^{\lambda_i} = P_{\lambda_0} \prod_{i=1}^n \prod_{j=0}^{N_i} \theta_{v_0, i, j}^{\lambda_{i, j}}$$

( $\lambda_i = (\lambda_{i,0}, \dots, \lambda_{i, N_i})$  est un uplet de longueur  $D_i$ ). En d'autres termes, cet espace s'identifie à l'ensemble des polynômes  $P$  de  $E \otimes_{v_0} \overline{\mathbf{Q}}$  tel que, pour tout  $(s, \mathbf{t}) \in \Upsilon$ , la dérivée  $\mathcal{D}_{\mathbf{w}}^{\mathbf{t}} F_{P, v_0}(s, su)$  est nulle. Nous savons que  $F$  n'est pas réduit à  $\{0\}$ . En effet, le système linéaire d'équations définissant  $F$  a été étudié au § 2.3 et nous avons vu que son rang  $\rho$  était majoré par  $C_0^{3/2} \frac{S_0}{S} \mathcal{H}(G_0 \times G; D'_0, \dots, D'_n)$ . Or, d'une part, le rapport  $S_0/S$  est inférieur à  $1/C_0^2$  (choix des paramètres) et, d'autre part, comme les paramètres  $D_i$ ,  $0 \leq i \leq n$ , ne sont pas tous nuls, il existe une constante  $c_{30}$  telle que  $\mathcal{H}(G_0 \times G; D'_0, \dots, D'_n) \leq c_{30} \dim E$ . Nous en déduisons que  $\rho \leq (\dim E)/2$  (pourvu que  $C_0$  soit assez grand) et donc  $\dim F \geq (\dim E)/2$ . Dans ces conditions, le lemme de Siegel absolu énoncé au § 2.7 fournit naturellement un élément de  $F \setminus \{0\}$  de « petite » hauteur, et, plus précisément, on a la

**Proposition 3.15.** *Il existe une constante  $c_{31} \geq 1$  et une famille  $(p_{\lambda})_{\lambda} \in F \setminus \{0\}$  de hauteur (logarithmique absolue)  $L^2$  majorée par*

$$c_{31} \left( \log D_0 + \max_{1 \leq i \leq n} \{D_i\} + \aleph((P_{\lambda_0})) + \sum_{i=1}^n D_i \max_{0 \leq s \leq (g+1)S} \{h(sp_i)\} \right. \\ \left. + T(1 + \chi_H + h_{L^2}(w_1) + \dots + h_{L^2}(w_{g-t})) \right)$$

L'élément  $(p_{\lambda})_{\lambda}$  représente les coefficients du polynôme auxiliaire  $P$  que l'on cherchait à construire (ainsi les notations  $(p_{\lambda})_{\lambda}$  et  $P$  sont-elles désormais fixées jusqu'à la fin de la preuve des théorèmes 1.4 et 1.5). Par la suite nous supposons qu'un des coefficients  $p_{\lambda}$  vaut 1 (ce qui est loisible puisque la hauteur  $L^2$  est projective), si bien que chacun des termes locaux intervenant dans  $h_{L^2}((p_{\lambda}))$  est positif.

*Démonstration de la proposition 3.15.* Comme nous l'avons mentionné ci-dessus, c'est le lemme 2.12 qui fournit l'élément  $(p_{\lambda})_{\lambda}$  de  $F \setminus \{0\}$  recherché. Sa hauteur est majorée par  $h(F)/(\dim F) + \log(\dim F)$  (en prenant le vecteur de hauteur minimale parmi ceux de la base apportée par ce lemme). La principale difficulté est d'évaluer soigneusement la hauteur de  $F$ , dans laquelle interviennent presque tous les paramètres, en séparant places archimédiennes et ultramétriques. L'écueil serait d'abîmer la « qualité » des estimations  $v$ -adiques obtenues aux paragraphes précédents 3.2 et 3.3 (en particulier, en faisant apparaître sous quelque forme que ce soit un terme en  $T \log(T)$ ).



Pour un multi-indice  $\lambda$  comme ci-dessus et  $(s, \mathbf{t}) \in \Upsilon$ , considérons un entier  $\varepsilon_{i,s} \in \{0, \dots, N_i\}$  pour lequel  $\theta_{v,i,\varepsilon_{i,s}}(su) \neq 0$ . Posons  $\varepsilon_s := (\varepsilon_{1,s}, \dots, \varepsilon_{n,s})$  et désignons par  $a_{\lambda,(s,\mathbf{t})}$  le nombre algébrique (élément de  $v_0(K)$ )

$$a_{\lambda,(s,\mathbf{t})} := \frac{1}{\mathbf{t}!} \mathcal{D}_{\mathbf{w}}^{\mathbf{t}} \left( \Psi_{v_0, \varepsilon_s}^{\lambda} \right) (s, su)$$

où  $\Psi_{v_0, \varepsilon_s}^{\lambda}$  est une notation condensée pour  $P_{\lambda_0} \prod_{i=1}^n \Psi_{v_0, i, \varepsilon_{i,s}}^{\lambda_i}$ . L'égalité

$$(52) \quad \Theta_{v_0}^{\lambda} = \left( \prod_{i=1}^n \theta_{v_0, i, \varepsilon_{i,s}}^{D_i} \right) \times \Psi_{v_0, \varepsilon_s}^{\lambda},$$

la formule de Leibniz et le fait que  $\Upsilon$  contienne à  $(s, \mathbf{t})$  fixé tous les  $(s, \mathbf{t}')$  avec  $|\mathbf{t}'| < |\mathbf{t}|$  permettent de décrire  $F$  avec les équations

$$\forall (s, \mathbf{t}) \in \Upsilon, \quad \sum_{\lambda} p_{\lambda} a_{\lambda,(s,\mathbf{t})} = 0.$$

Parmi ces équations, choisissons-en  $\text{codim } F = \dim E - \dim F$  linéairement indépendantes et formons alors la matrice  $F$  à  $\dim E$  lignes et  $\text{codim } F$  colonnes constituée des  $a_{\lambda,(s,\mathbf{t})}$  correspondants. De la sorte,  $F$  est de rang maximal et les vecteurs colonnes  $C_1, \dots, C_{\text{codim } F}$  de  $F$  forment une base de l'orthogonal  $F^{\perp}$  de  $F$  (pour le produit scalaire usuel). La formule de dualité de Schmidt  $h(F) = h(F^{\perp})$  permet alors de calculer la hauteur de  $F$  au moyen de ces vecteurs colonnes. Les coordonnées de Plücker (dans la base canonique de  $\overline{\mathbf{Q}}^{\dim E}$ ) des produits extérieurs  $C_1 \wedge \dots \wedge C_{\text{codim } F}$  conduisent à l'égalité

$$h(F) = \frac{1}{[K : \mathbf{Q}]} \sum_{\sigma: K \hookrightarrow \mathbf{C}} \log \left( \sum_{F_0} |\det F_0|_{\sigma}^2 \right)^{1/2} + \frac{1}{[K : \mathbf{Q}]} \sum_{v \nmid \infty} \log \max_{F_0} \{ |\det F_0|_v \}$$

où  $F_0$  parcourt les mineurs maximaux ( $\text{codim } F \times \text{codim } F$ ) de la matrice  $F$ . Nous appellerons  $h_{\infty}(F)$  (*resp.*  $h_f(F)$ ) la première (*resp.* la seconde) somme du membre de droite de cette égalité.

Étant donné une place archimédienne  $\sigma$  de  $K$  et un tel mineur  $F_0$ , l'inégalité de Hadamard entraîne

$$|\det F_0|_{\sigma} \leq \prod_{i=1}^{\text{codim } F} \|C_i\|_{\sigma}$$

(les colonnes de  $F_0$  étant en normes plus petites que celles de  $F$ ). Comme il y a  $\binom{\dim E}{\dim F}$  mineurs maximaux possibles pour  $F$ , on obtient

$$(53) \quad h_{\infty}(F) \leq \sum_{(s,\mathbf{t})} h_{\infty, L^2}((a_{\lambda,(s,\mathbf{t})})_{\lambda}) + \frac{1}{2} \log \binom{\dim E}{\dim F}$$

(la notation  $h_{\infty, L^2}$  signifie que nous n'avons pris que la somme portant sur les places archimédiennes de  $K$  des normes  $L^2$  des vecteurs  $(a_{\lambda,(s,\mathbf{t})})_{\lambda}$ ). Le lemme 3.12 fournit un majorant de chacun des  $|a_{\lambda,(s,\mathbf{t})}|_{\sigma}$  et donc une estimation de la somme ci-dessus.

En ce qui concerne l'estimation du déterminant  $\det F_0$  en une place ultramétrique  $v$ , nous constatons qu'il n'est pas possible d'utiliser en l'état

la proposition 3.11 puisque les coefficients de la matrice  $F_0$  ne proviennent pas (*a priori*) de polynômes qui s'annulent aux ordres de dérivations précédents. Nous allons donc faire apparaître de tels polynômes en procédant de la manière suivante. Considérons une colonne  $(s, \mathbf{t})$  de  $F_0$  telle que la longueur de  $\mathbf{t}$  soit maximale et notons  $L_1, \dots, L_{\text{codim } F}$  les lignes du mineur  $F_0$ , qui, elles-mêmes, correspondent (respectivement) aux lignes  $\lambda_{i_1}, \dots, \lambda_{i_{\text{codim } F}}$  de  $F$ . Si nous supprimons la colonne  $(s, \mathbf{t})$  de  $F_0$ , les lignes  $\tilde{L}_j$  de la matrice restante ( $j$  est un entier compris entre 1 et  $\text{codim } F$ , et  $\tilde{L}_j := (a_{\lambda_{i_j}, (s, \mathbf{t}')} )_{\mathbf{t}' \neq \mathbf{t}}$ ) sont liées sur  $\overline{\mathbf{Q}}$  et il est possible de trouver une relation de dépendance linéaire entre ces lignes sur  $K \cap \mathcal{O}_v$  avec au moins un des coefficients égal à 1. Pour cela, il suffit de considérer une relation sur  $\mathcal{O}_K$  puis de diviser par le coefficient dont la valeur absolue  $v$ -adique est minimale (non nulle). Autrement dit, il existe  $j_0 \in \{1, \dots, \text{codim } F\}$  et  $(\alpha_j)_{j \neq j_0} \in (K \cap \mathcal{O}_v)^{\text{codim } F - 1}$  tels que

$$\tilde{L}_{j_0} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq j_0}}^{\text{codim } F} \alpha_j \tilde{L}_j .$$

Ainsi, en soustrayant  $\sum_{j \neq j_0} \alpha_j L_j$  à la  $j_0^{\text{ème}}$  ligne de  $F_0$ , nous obtenons une matrice de même déterminant que  $F_0$  et dont la  $j_0^{\text{ème}}$  ligne est composée de zéros sauf à la position  $(s, \mathbf{t})$  où le coefficient est

$$\xi_{(s, \mathbf{t})} := a_{\lambda_{i_{j_0}, (s, \mathbf{t})}} - \sum_{j \neq j_0} \alpha_j a_{\lambda_{i_j}, (s, \mathbf{t})} .$$

Par conséquent, la valeur absolue  $v$ -adique de  $\det F_0$  est égale à  $|\xi_{(s, \mathbf{t})}|_v$  multiplié par la valeur absolue du déterminant d'un mineur  $\tilde{F}_0$  de taille  $\text{codim } F - 1$  de la matrice  $F$  à laquelle on a retiré la colonne  $(s, \mathbf{t})$  et la ligne  $j_0$ . Soit  $(q_\lambda)_\lambda$  l'élément de  $K^{\dim E}$  défini par  $q_{\lambda_{i_{j_0}}} = 1$ ,  $q_{\lambda_{i_j}} = -\alpha_j$  si  $j \in \{1, \dots, \text{codim } F\} \setminus \{j_0\}$  et  $q_\lambda = 0$  si  $L_\lambda$  n'est pas une ligne de  $F_0$ . Le polynôme  $Q$  correspondant à ces coordonnées vérifie

$$\mathcal{D}_{\mathbf{w}}^{\mathbf{t}'} \left( \sum_{\lambda} q_\lambda \Psi_{v_0, \varepsilon_s}^\lambda \right) (s, su) = 0$$

pour tout  $\mathbf{t}' \in \mathbf{N}^{\dim W}$  de longueur strictement inférieure à  $|\mathbf{t}|$  (puisque  $|\mathbf{t}|$  a été choisi maximal). En particulier l'égalité (52) et la formule de Leibniz entraînent, pour tout  $|\mathbf{t}'| < |\mathbf{t}|$ ,  $\mathcal{D}_{\mathbf{w}}^{\mathbf{t}'} F_{Q, v_0}(s, su) = 0$  et

$$\xi_{(s, \mathbf{t})} = \frac{1}{\prod_{i=1}^n \theta_{v_0, i, \varepsilon_{i, s}}(su)^{D_i}} \frac{\mathcal{D}_{\mathbf{w}}^{\mathbf{t}} F_{Q, v_0}(s, su)}{\mathbf{t}!} .$$

La proposition 3.11 peut donc s'appliquer à  $\xi_{(s, \mathbf{t})}$ , ce qui fournit une majoration de  $|\xi_{(s, \mathbf{t})}|_v$  (indépendante de la taille  $v$ -adique des coefficients de  $Q$ ). En opérant de la même manière pour  $\tilde{F}_0$ , nous déduisons par récurrence immédiate que  $|\det F_0|_v$  s'écrit comme un produit  $\prod_{i=1}^{\text{codim } F} |\xi_{(s_i, \mathbf{t}_i)}|_v$  où chacun des  $\xi_{(s_i, \mathbf{t}_i)}$  est borné comme dans la formule (49) de la proposition 3.11. La majoration du logarithme de  $\max_{F_0} \{|\det F_0|_v\}$  qui en découle (valable pour toute place ultramétrique  $v$ ) et l'inégalité archimédienne (53) entraînent alors la proposition 3.15. □

**3.5. Extrapolation.** Étant donné  $(s, \boldsymbol{\tau}) \in \mathbf{N} \times \mathbf{N}^{\dim W}$  et  $P$  le polynôme construit au paragraphe précédent, nous disposons d'un coefficient de Taylor tordu

$$(54) \quad \frac{1}{\prod_{i=1}^n \theta_{v_0, i, \varepsilon_i}(su)^{D_i}} \frac{\mathcal{D}_{\mathbf{w}}^{\boldsymbol{\tau}}}{\boldsymbol{\tau}!} \left( P \circ \exp_{(G_0 \times G)(\mathbf{C}_{v_0})} \right) (s, su) \quad (\text{voir (45)}).$$

Pour une raison technique qui apparaîtra à la fin de la preuve de la proposition 3.20 (p. 44), nous supposons que  $\varepsilon_i \in \{0, \dots, N_i\}$  est choisi de telle sorte que

$$|\theta_{v_0, i, \varepsilon_i}(su)|_{v_0} = \max_{0 \leq j \leq N_i} \{|\theta_{v_0, i, j}(su)|_{v_0}\}.$$

En particulier  $\theta_{v_0, i, \varepsilon_i}(su) \neq 0$  mais aussi, pour toute autre place  $v$  de  $K$ ,  $\theta_{v, i, \varepsilon_i}(su) \neq 0$ . D'après le lemme 2.7 et le choix des paramètres (voir l'inégalité ② du lemme 3.1), il existe un couple  $(s, \boldsymbol{\tau})$  avec  $0 \leq s \leq (g+1)S$  et  $|\boldsymbol{\tau}| \leq (g+1)T$  pour lequel le nombre (54) est non nul. Parmi ces couples, choisissons-en un tel que  $(s, |\boldsymbol{\tau}|)$  soit minimal pour l'ordre lexicographique dans  $\mathbf{N}^2$ , et notons  $\alpha$  le terme (54) correspondant. On notera que par construction de  $P$  on a nécessairement  $s \geq S_0 + 1$  et  $\alpha \in K$  (voir lemme 3.9). Les propositions 3.11 et 3.13 apportent des estimations de  $|\alpha|_v$  en toutes les places  $v$  de  $K$  et, par suite, de la hauteur de Weil de  $\alpha$ .

Considérons une place *quelconque* de  $K$  au-dessus de  $v_0$ , place que nous noterons encore  $v_0$ . Nous allons donner ici une majoration de  $|\alpha|_{v_0}$  qui dépend de la distance  $d_{v_0}(u, V)$  de sorte que si celle-ci est « trop petite », il y aura une contradiction avec la formule du produit.

Inventée par A. Baker, la démarche consiste à déplacer la question sur une droite de  $W$ . Plus précisément, si  $\tilde{u}$  est un élément de  $V \otimes \mathbf{C}_{v_0}$  tel que  $d_{v_0}(u, V) = \|u - \tilde{u}\|_{v_0}$ , il revient au même — modulo un terme d'erreur linéaire en  $d_{v_0}(u, V)$  — de majorer (54) avec  $(s, s\tilde{u})$  au lieu de  $(s, su)$  (sous réserve, dans le cas  $p$ -adique, d'avoir vérifié que  $\tilde{u}$  appartenait bien à  $\mathcal{T}_{v_0}$ ). Le point remarquable est alors le suivant. La fonction analytique définie dans le disque unité de  $\mathbf{C}_{v_0}$  par

$$f_{\boldsymbol{\tau}}(z) = \frac{\mathcal{D}_{\mathbf{w}}^{\boldsymbol{\tau}}}{\boldsymbol{\tau}!} \left( P \circ \exp_{(G_0 \times G)(\mathbf{C}_{v_0})} \right) (z, z\tilde{u})$$

admet des dérivées (divisées) qui sont elles-mêmes des combinaisons linéaires très simples des  $f_{\boldsymbol{\tau}'}$ , avec  $|\boldsymbol{\tau}'| = |\boldsymbol{\tau}| + \text{ordre de dérivation}$ , car  $(1, \tilde{u}) \in W \otimes \mathbf{C}_{v_0}$ . Un lemme d'interpolation permet alors de majorer aisément  $|f_{\boldsymbol{\tau}}(s)|_{v_0}$  en fonction des valeurs  $|f_{\boldsymbol{\tau}'}(s_0)|_{v_0}$  pour  $0 \leq s_0 \leq S_0$  et  $|\boldsymbol{\tau}'| \leq 2(g+1)T$ .

Ce schéma de démonstration ne dépend pas vraiment de la nature, archimédienne ou  $p$ -adique, de la place  $v_0$ . Néanmoins, il me semble préférable dans un souci de clarté pour la présentation de distinguer ces deux cas.

**3.5.1.  $v_0$  archimédienne.** Avant d'énoncer la proposition principale, commençons par quelques résultats préliminaires usuels dans ce contexte.

**Lemme 3.16.** *Il existe une constante  $c_{32} \geq 1$  ayant la propriété suivante. Soit  $\mathbf{z} = (z_0, \dots, z_n) \in t_{G_0}(\mathbf{C}_{v_0}) \oplus t_G(\mathbf{C}_{v_0})$ ,  $\boldsymbol{\lambda} = (\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_n) \in \mathbf{N} \times \prod_{i=1}^n \mathbf{N}^{N_i+1}$  et  $\mathbf{h} = (h_0, \dots, h_{g-t}) \in \mathbf{N}^{\dim W}$ . Alors la valeur absolue du*

coefficient  $\frac{1}{\mathbf{h}!} \mathcal{D}_{\mathbf{w}}^{\mathbf{h}} \Theta^{\lambda}(\mathbf{z})$  est majorée par

$$c_{32}^{|\mathbf{h}|+|\lambda|} \left( \prod_{j=1}^{g-t} \|w_j\|_{v_0}^{h_j} \right) \max_{\lambda_0} \left\{ \left| \frac{1}{h_0!} P_{\lambda_0}^{(h_0)}(z_0) \right| \right\} \exp \left\{ c_{32} \sum_{i=1}^n |\lambda_i| (1 + \|z_i\|_{v_0})^{\rho_i} \right\}$$

(voir (51) pour la définition de  $\Theta^{\lambda}$ ).

La preuve de ce lemme est essentiellement la même que celle du lemme 3.12 en tenant compte de l'inégalité (14).

Soit  $m \in \mathbf{N}$ ,  $\mathbf{h} \in \mathbf{N}^{\dim W}$  et  $F = F_{P, v_0}$  la fonction associée à  $P$ . Soit également (comme dans l'introduction)  $\tilde{u}$  un vecteur de  $V \otimes_{v_0} \mathbf{C}$  pour lequel  $d_{v_0}(u, V) = \|u - \tilde{u}\|_{v_0}$ . Le théorème des accroissements finis appliqué à la fonction

$$x \mapsto \frac{1}{\mathbf{h}!} \mathcal{D}_{\mathbf{w}}^{\mathbf{h}} F(m, mu + xm(\tilde{u} - u))$$

de la variable réelle  $x \in [0, 1]$  entraîne alors immédiatement le

**Lemme 3.17.** *Il existe une constante  $c_{33} \geq 1$  ayant la propriété suivante. Avec les notations ci-dessus, la valeur absolue de la différence*

$$\frac{1}{\mathbf{h}!} \mathcal{D}_{\mathbf{w}}^{\mathbf{h}} F(m, mu) - \frac{1}{\mathbf{h}!} \mathcal{D}_{\mathbf{w}}^{\mathbf{h}} F(m, m\tilde{u})$$

est majorée par

$$c_{33}^{T+\log(D_0)} \max_{\lambda} \{ |p_{\lambda}|_{v_0} \} \left( \prod_{j=1}^{g-t} \|w_j\|_{v_0}^{h_j} \right) m d_{v_0}(u, V) \\ \times \max_{\lambda_0} \left\{ \left| \frac{1}{h_0!} P_{\lambda_0}^{(h_0)}(m) \right| \right\} \times \exp \left\{ c_{33} \sum_{i=1}^n D_i (1 + m \|u_i\|_{v_0})^{\rho_i} \right\}$$

pourvu que  $d_{v_0}(u, V) \leq 1$ .

Pour plus de détails sur la preuve, le lecteur pourra consulter (par exemple) ma thèse [20], p. 34.

Enfin, nous aurons aussi besoin du lemme d'interpolation suivant, dû à M. Waldschmidt [48]. Si  $x$  est un nombre réel positif et  $f$  une fonction définie sur le disque fermé  $\overline{D}(0, x) = \{z \in \mathbf{C}; |z| \leq x\}$ , nous notons  $|f|_x$  la borne supérieure des  $|f(z)|$ ,  $z \in \overline{D}(0, x)$ .

**Lemme 3.18.** *Soit  $S_1, T_1$  des entiers naturels strictement positifs et  $R \geq r \geq 2S_1$  des nombres réels. Soit  $f$  une fonction analytique (d'une variable complexe) dans le disque  $\overline{D}(0, R)$ . Alors on a*

$$|f|_r \leq 2|f|_R \left( \frac{2r}{R} \right)^{T_1 S_1} + 5 \left( \frac{9r}{S_1} \right)^{T_1 S_1} \times \max_{\substack{0 \leq h < T_1 \\ 0 \leq m < S_1}} \left\{ \left| \frac{1}{h!} f^{(h)}(m) \right| \right\}.$$

**Remarque 3.19.** Jusqu'ici nous avons pu ne remplacer aucun des paramètres  $T, S, D_0, \dots, D_n$  par leurs valeurs données au § 3.1 tout en conservant une (relative) simplicité des estimations. Ce principe s'avère dorénavant presque impossible à tenir sans alourdir exagérément certaines inégalités (dont la simple écriture au format de ce papier requerrait alors une page entière). En revanche, nous devons conserver les termes mettant en jeu les coefficients de  $P$  et la base  $\mathbf{w}$  car ces objets ne sont pas définis sur  $k$  ( $a$

*priori*) mais sur  $K$  et seule une estimation « globale » avec la formule du produit permettra de les contrôler.

De la sorte, pour  $m \leq S$  et au moyen des inégalités du lemme 3.1, le majorant du lemme 3.17 s'écrit plus simplement

$$\max_{\lambda} \{ |p_{\lambda}|_{v_0} \} \max_j \{ 1, \|w_j\|_{v_0} \}^{c_{34}T} e^{c_{34}U} d_{v_0}(u, V)$$

pour une certaine constante  $c_{34} \geq 1$  et où  $j$  parcourt l'ensemble  $\{1, \dots, g-t\}$ .

Le résultat central de ce paragraphe est le suivant.

**Proposition 3.20.** *Supposons que  $\log d_{v_0}(u, V) \leq -C_0^3 U$ . Alors*

$$|\alpha|_{v_0} \leq e^{-U} \max_{\lambda} \{ |p_{\lambda}|_{v_0} \} \max \{ 1, \|w_1\|_{v_0}, \dots, \|w_{g-t}\|_{v_0} \}^{C_0 T} .$$

*Démonstration.* Soit  $f : \mathbf{C} \rightarrow \mathbf{C}$  la fonction entière définie par

$$f(z) = \frac{1}{\tau!} \mathcal{D}_{\mathbf{w}}^{\tau} F(z, z\tilde{u}) .$$

Soit  $\mathbf{x} := (x_0 = 1, x_1, \dots, x_{g-t})$  les coordonnées de  $(1, \tilde{u})$  dans la base  $\mathbf{w}$ . La hauteur  $L^2$  de  $w_i$  est projective et quitte à multiplier  $w_i$  par un entier assez grand\* (pour  $1 \leq i \leq g-t$ ), nous pouvons supposer que  $|x_i| \leq 1$ . Pour tout entier  $\ell \geq 0$ , la dérivée  $\ell^{\text{ème}}$  de  $f$  vérifie la formule

$$\frac{f^{(\ell)}(z)}{\ell!} = \sum_{\substack{\mathbf{j} \in \mathbf{N}^{\dim W} \\ |\mathbf{j}| = \ell}} \binom{\tau + \mathbf{j}}{\mathbf{j}} \mathbf{x}^{\mathbf{j}} \frac{\mathcal{D}_{\mathbf{w}}^{\tau + \mathbf{j}} F(z, z\tilde{u})}{(\tau + \mathbf{j})!}$$

et donc il existe une constante  $c_{35} \geq 1$  telle que

$$(55) \quad \max_{\substack{\ell \leq (g+1)T \\ s_0 \leq S_0}} \left\{ \left| \frac{f^{(\ell)}(s_0)}{\ell!} \right| \right\} \leq c_{35}^T \max_{(s_0, \mathbf{j}) \in \Upsilon} \left| \frac{\mathcal{D}_{\mathbf{w}}^{\mathbf{j}} F(s_0, s_0\tilde{u})}{\mathbf{j}!} \right| .$$

Si l'on remplace  $\tilde{u}$  par  $u$  dans le membre de droite de cette inégalité, le terme obtenu est nul par construction de  $F$ . Par conséquent, le lemme de comparaison 3.17 entraîne la majoration

$$\max_{\substack{\ell \leq (g+1)T \\ s_0 \leq S_0}} \left\{ \left| \frac{f^{(\ell)}(s_0)}{\ell!} \right| \right\} \leq e^{-C_0^2 U} \max_{\lambda} \{ |p_{\lambda}|_{v_0} \} \max_j \{ 1, \|w_j\|_{v_0} \}^{c_{36}T} .$$

De même, le lemme 3.16 conduit à la majoration

$$(56) \quad |f|_{\mathbf{R}} \leq \max_{\lambda} \{ |p_{\lambda}|_{v_0} \} e^{(U/2 + \sum_{i=1}^n C_0 D_i (1+R) \|u_i\|_{v_0}^{\rho_i})} \times \max_{\substack{\lambda_0 \\ |z_0| \leq \mathbf{R}}} \left\{ \left| \frac{1}{\tau_0!} P_{\lambda_0}^{(\tau_0)}(z_0) \right| \right\} \\ \times \max_j \{ \|w_j\|_{v_0} \}^{c_{37}T}$$

valide pour tout nombre réel  $\mathbf{R} \in [1, d_{v_0}(u, V)^{-1}]$ . En prenant  $\mathbf{R} := 2\epsilon(g+1)S$ , nous constatons que le produit des deux dernières quantités de la première ligne du membre de droite de (56) est inférieure à  $e^U$ , ce qui fournit

\*Par exemple,  $2 \max \{ 1, \lfloor |x_1| \rfloor, \dots, \lfloor |x_{g-t}| \rfloor \}$  convient. Cette astuce ne dépend que de la place  $v_0$  sur  $k$  (et non du choix de la place de  $K$  au-dessus de  $v_0$ ).

la majoration plus simple

$$|f|_{\mathbb{R}} \leq \max_{\lambda} \{ |p_{\lambda}|_{v_0} \} \max_j \{ 1, \|w_j\|_{v_0} \}^{c_{37}T} e^U .$$

Mentionnons que pour cela nous avons utilisé les inégalités ④ et ⑥ du lemme 3.1. Choisissons  $T_1 := (g+1)T$ ,  $S_1 := S_0$ ,  $r := s$  et appliquons le lemme d'interpolation 3.18 à ces données et à la fonction  $f$ . Il vient

$$|f(s)| \leq e^{-C_0U} \max_{\lambda} \{ |p_{\lambda}| \} \max_j \{ 1, \|w_j\|_{v_0} \}^{c_{38}T}$$

(rappelons que  $r/S_1 = s/S_0 \leq S/S_0 \leq C_0^4$ ), puis, par une seconde application du lemme de comparaison 3.17, nous obtenons

$$\left| \frac{1}{\tau!} \mathcal{D}_{\mathbf{w}}^{\tau} F(s, su) \right| \leq 2 e^{-C_0U} \max_{\lambda} \{ |p_{\lambda}| \} \max_j \{ 1, \|w_j\|_{v_0} \}^{c_{39}T} .$$

La borne pour  $|\alpha|_{v_0}$  se déduit de cette inégalité *via* la minoration de  $|\theta_{v_0, i, \varepsilon_i}(su)|$  donnée par l'inégalité (14) (p. 16) et grâce au choix de  $\varepsilon_i$ .  $\square$

3.5.2.  $v_0$  ultramétrique. Considérons le nombre algébrique  $\alpha$  introduit au début du paragraphe 3.5. La condition de minimalité sur  $(s, |\tau|)$  implique que  $\alpha$  est aussi égal à

$$(57) \quad \frac{\mathcal{D}_{\mathbf{w}}^{\tau}}{\tau!} \left( \sum_{\lambda} p_{\lambda} \Psi_{v_0, 0}^{\lambda} \right) (s, su)$$

où, comme dans la démonstration de la proposition 3.15,  $\Psi_{v_0, 0}^{\lambda}$  désigne

$$P_{\lambda_0}(z_0) \prod_{i=1}^n \Psi_{v_0, i, 0}^{\lambda_i} .$$

Dans la suite, nous noterons  $\tilde{F}$  la somme des  $p_{\lambda} \Psi_{v_0, 0}^{\lambda}$ . L'écriture (57) pour  $\alpha$  s'avère plus commode dans le cas ultramétrique car l'on connaît un développement en série de  $\Psi_{v_0, 0}^{\lambda}$ , qui converge sur le disque ouvert  $D(0, r_p)$  :

$$\forall \lambda, \exists (a_{\mathbf{i}, \lambda})_{\mathbf{i}} \in \mathcal{O}_v^{\mathbf{N}^g} ; \quad \Psi_{v_0, 0}^{\lambda}(z) = P_{\lambda_0}(z_0) \left( \sum_{\mathbf{i} \in \mathbf{N}^g} \frac{a_{\mathbf{i}, \lambda}}{\mathbf{i}!} \mathbf{z}^{\mathbf{i}} \right)$$

lorsque  $\mathbf{z} = (z_1, \dots, z_g)$  désigne les coordonnées de  $z \in D(0, r_p)$  dans la base  $\mathbf{e}$  (rappelons que c'est précisément le choix de cette base qui assure l'intégralité des coefficients  $a_{\mathbf{i}, \lambda}$ , voir § 1.1). Nous avons conservé  $P_{\lambda_0}(z_0)$  intact dans ce développement pour des raisons pratiques afin de ne pas mélanger les coefficients de  $P_{\lambda_0}$  (qui n'appartiennent pas nécessairement à  $\mathcal{O}_v$ ) avec les  $a_{\mathbf{i}, \lambda} \in \mathcal{O}_v$ . Pour tout uplet  $\mathbf{h} = (h_0, \mathbf{h}') \in \mathbf{N} \times \mathbf{N}^g$  et tout élément  $(z_0, z) \in t_{G_0}(\mathbf{C}_{v_0}) \times D(0, r_p)$ , nous obtenons alors

$$(58) \quad \frac{\mathcal{D}_{\mathbf{e}}^{\mathbf{h}}}{\mathbf{h}!} \tilde{F}(z_0, z) = \sum_{\lambda, \mathbf{i}} p_{\lambda} \frac{P_{\lambda_0}^{(h_0)}(z_0)}{h_0!} \frac{a_{\mathbf{i}, \lambda}}{(\mathbf{i} - \mathbf{h}')!} \mathbf{z}^{\mathbf{i} - \mathbf{h}'}$$

( $\mathbf{i}$  parcourt  $\{(i_1, \dots, i_g) \in \mathbf{N}^g ; \forall j \in \{1, \dots, g\}, i_j \geq h'_j\}$ ). Pour  $j$  un entier naturel, notons  $\sigma_p(j)$  la somme des chiffres de  $j$  écrit en base  $p$ . On sait que la valuation  $p$ -adique de  $j!$  est  $(j - \sigma_p(j))/(p-1)$  ce qui entraîne  $|j!|_{v_0} \geq r_p^j$  et, plus généralement, pour  $\mathbf{i} \in \mathbf{N}^g$ ,  $|\mathbf{i}!|_{v_0} \geq r_p^{|\mathbf{i}|}$  si bien que  $|\mathbf{z}^{\mathbf{i}}/\mathbf{i}!|_{v_0} \leq 1$  pour

$z \in D(0, r_p)$ . De l'égalité (58) et de l'inégalité ultramétrique se déduit la majoration

$$(59) \quad \left| \frac{\mathcal{D}_{\mathbf{h}}^{\mathbf{e}}}{\mathbf{h}!} \tilde{F}(z_0, z) \right|_{v_0} \leq \max_{\lambda} \{ |p\lambda|_{v_0} \} \max_{\lambda_0} \left\{ \left| \frac{P_{\lambda_0}^{(h_0)}(z_0)}{h_0!} \right|_{v_0} \right\}$$

valide pour tout  $(z_0, z) \in t_{G_0}(\mathbf{C}_v) \times D(0, r_p)$ . Cette inégalité se généralise immédiatement à une base quelconque  $\mathbf{e}' = (e'_0, \dots, e'_g)$  de  $t_{G_0 \times G}(\mathbf{C}_{v_0})$  en multipliant le membre de droite par  $\prod_{j=0}^g \|e'_j\|_{v_0}^{h_j}$ . De la même façon, l'estimation

$$|\mathbf{z}^{\mathbf{i}} - \mathbf{z}'^{\mathbf{i}}| \leq \|z - z'\|_{v_0} \max \{ \|z\|_{v_0}, \|z'\|_{v_0} \}^{|\mathbf{i}|-1}$$

conduit au lemme de comparaison suivant.

**Lemme 3.21.** *Supposons que  $d_{v_0}(u, V) = \|u - \tilde{u}\|_{v_0}$  est strictement inférieure à  $r_p$ . Alors, pour tout couple  $(m, \mathbf{h}) \in \mathbf{N} \times \mathbf{N}^{\dim W}$ , la valeur absolue de la différence  $\frac{\mathcal{D}_{\mathbf{h}}^{\mathbf{e}}}{\mathbf{h}!} \tilde{F}(m, mu) - \frac{\mathcal{D}_{\mathbf{h}}^{\mathbf{e}}}{\mathbf{h}!} \tilde{F}(m, m\tilde{u})$  est majorée par*

$$\max_{\lambda} \{ |p\lambda|_{v_0} \} \max_{\lambda_0} \left\{ \left| \frac{P_{\lambda_0}^{(h_0)}(m)}{h_0!} \right|_{v_0} \right\} \prod_{j=1}^{g-t} \|w_j\|_{v_0}^{h_j} \times d_{v_0}(u, V).$$

La condition  $\|u - \tilde{u}\|_{v_0} < r_p$  équivaut à  $\|\tilde{u}\|_{v_0} < r_p$  (puisque  $\|u\|_{v_0} < r_p$ ) et assure de la sorte la cohérence de l'énoncé.

Enfin, comme dans le cas archimédien, nous aurons besoin d'un lemme d'interpolation (en une variable), dû à D. Roy [41].

**Lemme 3.22.** *Soit  $S_1, T_1$  des entiers  $\geq 1$  et  $R \geq r \geq 1$  des nombres réels. Posons*

$$\kappa := \frac{S_1 - \sigma_p(S_1)}{p-1} + \left\lceil \frac{\log S_1}{\log p} \right\rceil$$

*Soit  $f : \overline{D}(0, R) \rightarrow \mathbf{C}_p$  une fonction analytique. Alors*

$$\frac{|f|_r}{r^{(S_1+1)T_1}} \leq p^{\kappa T_1} \max \left\{ \max_{\substack{0 \leq m < S_1 \\ 0 \leq h < T_1}} \left\{ \left| \frac{f^{(h)}(m)}{h!} \right| \right\}, \left( \frac{1}{R} \right)^{(S_1+1)T_1} |f|_R \right\}.$$

*Démonstration.* Il s'agit d'un cas très particulier du corollaire 1.2 de [41] qui avait été conjecturé par P. Robba en 1978. Avec les notations de cet article, choisissons  $K = \mathbf{C}_p$ ,  $n = \rho = 1$ ,  $E = \Omega = \{0, \dots, S_1\}$ ,  $L = M = (S_1 + 1)T_1$ . L'énoncé de D. Roy donne le résultat avec  $\Delta(E)\delta(E)$  à la place de  $p^{-\kappa}$ , où  $\Delta(E) = \min_{x \in E} \prod_{y \in E \setminus \{x\}} |y - x|_{v_0}$  et  $\delta(E) = \min_{x \neq y \in E} |y - x|_{v_0}$ . En observant que  $\Delta(E) = |S_1!|_{v_0}$ , on vérifie aisément que  $\Delta(E)\delta(E) = |p|_{v_0}^{\kappa} = p^{-\kappa}$ .  $\square$

Ces préliminaires à l'extrapolation étant acquis, nous allons être en mesure de démontrer la

**Proposition 3.23.** *Supposons que  $\log d_{v_0}(u, V) \leq -C_0^3(1 + (\log r_p^{-1})/\log \mathfrak{r})U$ . Alors*

$$|\alpha|_{v_0} \leq e^{-U} \max_{\lambda} \{ |p\lambda|_{v_0} \} \max_j \{ 1, \|w_j\|_{v_0} \}^{C_0 T}.$$

*Démonstration.* Elle suit d'assez près celle de la proposition 3.20 en comportant néanmoins quelques variantes liées, en particulier, à la finitude du rayon de convergence de l'exponentielle  $p$ -adique. Soit  $D_u = \{z \in \mathbf{C}_p, zu \in \mathcal{T}_{v_0}\}$  et  $f : D_u \rightarrow \mathbf{C}_p$  la fonction définie par  $f(z) = \frac{1}{\mathfrak{r}!} \mathcal{D}_{\mathfrak{w}}^{\mathfrak{r}} \tilde{F}(z, z\tilde{u})$ . L'hypothèse  $\log d_{v_0}(u, V) \leq -C_0^3 U$  entraîne la majoration  $\|u - \tilde{u}\|_{v_0} < \|u\|_{v_0}$  et donc  $\|u\|_{v_0} = \|\tilde{u}\|_{v_0}$ , ce qui assure l'analyticité de  $f$  sur  $D_u$ . Les dérivées de cette application vérifient la même formule que dans le cas archimédien et la majoration (55) est vraie avec  $c_{35} = 1$ . Le lemme 3.21 entraîne alors

$$(60) \quad \begin{aligned} \max_{\substack{0 \leq s_0 \leq S_0 \\ 0 \leq \ell \leq (g+1)T}} \left\{ \left| \frac{f^{(\ell)}(s_0)}{\ell!} \right|_{v_0} \right\} &\leq \max \{ |p\lambda|_{v_0} \} \max_{\substack{\lambda_0 \\ h_0 \leq (g+1)T \\ s_0 \leq S_0}} \left\{ \left| \frac{P_{\lambda_0}^{(h_0)}(s_0)}{h_0!} \right|_{v_0} \right\} d_{v_0}(u, V) \\ &\quad \times \max \{ 1, \|w_1\|_{v_0}, \dots, \|w_{g-t}\|_{v_0} \}^{2(g+1)T} \\ &\leq \max \{ |p\lambda|_{v_0} \} \max_j \{ 1, \|w_j\|_{v_0} \}^{2(g+1)T} \\ &\quad \times \exp \{ -C_0^2 (1 + (\log r_p^{-1}) / \log \mathfrak{r}) U \}. \end{aligned}$$

En outre, de l'inégalité (59) et de la remarque qui suit, nous déduisons la majoration

$$|f|_{\mathbf{R}} \leq \max \{ |p\lambda|_{v_0} \} \max_{\substack{\lambda_0 \\ |z_0| \leq \mathbf{R}}} \left\{ \left| \frac{P_{\lambda_0}^{(\tau_0)}(z_0)}{\tau_0!} \right|_{v_0} \right\} \prod_{j=1}^{g-t} \|w_j\|_{v_0}^{\tau_j}$$

valide pour tout  $\mathbf{R}$  dans l'intervalle  $\left[ 0, \frac{r_p}{\|u\|_{v_0}} \right]$ . En appliquant le lemme d'interpolation 3.22 avec  $S_1 := S_0$ ,  $T_1 := (g+1)T$ ,  $r := 1$  et  $\mathbf{R} := \mathfrak{r} r_p^{-1}$  à la fonction  $f := f$ . Le nombre  $\kappa = (S_0 - \sigma_p(S_0)) / (p-1) + \lceil \log S_0 / \log p \rceil$  de ce lemme est naturellement majoré par  $S_0 / (p-1) + (\log S_0) / \log p$  et le choix des paramètres entraîne

$$p^{\kappa(g+1)T} \leq (r_p^{-1})^{(g+1)TS_0} e^U \leq \exp \{ C_0^{3/2} (1 + (\log r_p^{-1}) / \log \mathfrak{r}) U \}.$$

De la sorte, et grâce à l'estimation (60), nous obtenons

$$p^{\kappa(g+1)T} \max_{\substack{0 \leq s_0 \leq S_0 \\ 0 \leq \ell \leq (g+1)T}} \left\{ \left| \frac{f^{(\ell)}(s_0)}{\ell!} \right|_{v_0} \right\} \leq \max \{ |p\lambda|_{v_0} \} \max_j \{ 1, \|w_j\|_{v_0} \}^{2(g+1)T} e^{-C_0 U}.$$

Et par ailleurs nous avons

$$p^{\kappa(g+1)T} \left( \frac{1}{\mathbf{R}} \right)^{(S_0+1)(g+1)T} |f|_{\mathbf{R}} \leq \max \{ |p\lambda|_{v_0} \} \max_j \{ 1, \|w_j\|_{v_0} \}^{2(g+1)T} e^{-C_0^{1/2} U}.$$

Le lemme 3.22 implique alors

$$|f(s)| \leq |f|_1 \leq \max_{\lambda} \{ |p\lambda| \} \max_j \{ \|w_j\|_{v_0} \}^{c_{40}T} e^{-C_0^{1/2} U}$$

et nous concluons avec le lemme 3.21.  $\square$



**3.6. Fin de la démonstration.** Comme nous l'avons vu, le nombre algébrique  $\alpha$  introduit au paragraphe précédent est non nul et satisfait donc à la formule (du produit) :

$$(61) \quad \sum_{\substack{v \text{ place de } K \\ v \nmid v_0}} \frac{[K_v : \mathbf{Q}_v]}{[K : \mathbf{Q}]} \log |\alpha|_v = - \sum_{v|v_0} \frac{[K_v : \mathbf{Q}_v]}{[K : \mathbf{Q}]} \log |\alpha|_v .$$

D'après les propositions 3.11 et 3.13 (appliquées avec  $(z_0, z) = (s, su)$ ), il existe une constante  $c_{41}$  telle que le membre de gauche soit majoré par

$$(62) \quad c_{41} \left( T(\chi_H + h_{L^2}(w_1) + \cdots + h_{L^2}(w_{g-t})) + h(P) + \sum_{i=1}^n D_i h(sp_i) + \aleph((P_{\lambda_0})) \right).$$

Par construction, nous disposons d'une majoration de la somme des  $h_{L^2}(w_j)$  (voir § 3.1.3) ainsi que de la hauteur de  $P$ , donnée par la proposition 3.15. En vertu du lemme 3.6, la quantité  $\chi_H$  est bornée. Les lemmes 3.1 et 3.2 montrent alors que la quantité (62) est majorée par  $U/(C_0D)$ . Quant au membre de droite de l'égalité (61), il est minoré par  $U/D - h(P) - C_0 \sum_j h_{L^2}(w_j) \geq U/(2D)$  dès lors que  $\log d_{v_0}(u, V) \leq -C_0^3 U$  (*resp.*  $\log d_{v_0}(u, V) \leq -C_0^3(1 + (\log r_p^{-1})/\log \mathfrak{r})U$ ) si  $v_0$  est archimédienne (*resp.* ultramétrique). Nous constatons alors une contradiction avec le majorant  $U/(C_0D)$ . Ce qui conclut la démonstration des théorèmes 1.4 et 1.5 (en observant pour ce dernier que le terme  $1 + (\log r_p^{-1})/\log \mathfrak{r}$  est majoré par  $c_{42} \log(\mathfrak{r} + 1)/\log \mathfrak{r}$  pour une certaine constante absolue  $c_{42}$ ).

#### 4. CONCLUSION

Des mesures d'indépendance linéaire de logarithmes d'un groupe algébrique commutatif ou d'une variété abélienne ont été obtenues récemment par S. David & N. Hirata-Kohno [14] et l'auteur [21, 22]. Aussi, pour compléter cette étude, nous allons décrire les différences essentielles qui séparent les démonstrations de ces articles avec celle donnée ici au § 3. Auparavant il nous faut mentionner que, sous une forme ou une autre, l'approche commune à tous ces articles est la *méthode de Baker* qui permet d'extrapoler sur les multiples du point considéré (comme ici au § 3.5). Ce qui diffère — et, semble-t-il, sans possibilité de conciliation — est la partie arithmétique de la démonstration. Les articles [14, 21, 22] ne comportent aucune hypothèse d'algébricité de la sous-algèbre de Lie  $W$ . Toutefois il s'avère que l'on peut quand même obtenir de très fines estimations arithmétiques à condition d'employer simultanément le procédé de réduction de N. Hirata-Kohno et la méthode de changement de variables de Chudnovsky. Sans entrer dans les détails, rappelons que le premier procédé consiste à transformer les données  $(G, p, u, W, \dots)$  de départ afin que le « nouveau » sous-espace remplaçant  $W$  devienne transversal à l'espace tangent de  $G$  (\*). On notera que cela n'est pas le cas ici où nous avons seulement ajouté l'espace tangent à  $\mathbb{G}_a$  à l'espace d'origine  $t_G$ . En effet, cette phase ne conserve pas la rationalité de  $W$  et sa mise en œuvre reviendrait à oublier cette hypothèse ! Cela explique

\*Si l'on note  $W'$  ce nouvel espace, alors  $W' = \{\lambda(y) \oplus y, y \in t_G\}$  où  $\lambda : t_G \rightarrow t_G/W$  est la projection canonique.

pourquoi, dans un cadre formel en apparence similaire, les conditions sur les paramètres et les choix qui s'ensuivent (en particulier le choix de l'entier  $\mathfrak{a}$ ) sont radicalement différents entre cet article et, par exemple, [21].

À ces différences structurelles s'ajoute la question de l'effectivité des résultats obtenus. Nous avons montré dans [22] que la méthode des pentes de J.-B. Bost permettait de calculer explicitement toutes les constantes qui sont dans la minoration de formes linéaires de logarithmes, au moins lorsque le groupe algébrique ambiant est une variété abélienne (le cas des tores étant quant à lui explicite depuis les prémices de la théorie). Grâce à l'hypothèse sur le point  $p$  faite ici, et que l'on retrouve (à l'identique) dans [22], il est possible de redémontrer les théorèmes 1.4 et 1.5 au moyen de cette méthode, les arguments et les choix de paramètres étant identiques. Seul le lemme de Siegel absolu n'aurait pas lieu d'être puisqu'il n'y a pas de construction de polynôme auxiliaire dans la méthode des pentes. En particulier si l'on se restreint à une variété abélienne, l'on peut sans autre difficulté que la lourdeur de certains calculs obtenir des mesures d'indépendance linéaire de logarithmes *entièrement explicites*. Il serait alors intéressant de comparer, dans le cas ultramétrique, la dépendance en la caractéristique résiduelle de la constante ainsi obtenue et celle du résultat général (sans hypothèse sur  $W$ ) annoncé par N. Hirata-Kohno dans le cas d'un produit de courbes elliptiques (2004).

#### RÉFÉRENCES

- [1] M. ABLY. Formes linéaires de logarithmes de points algébriques sur une courbe elliptique de type CM. *Ann. Inst. Fourier (Grenoble)*, 50(1):1–33, 2000.
- [2] M. ABLY et É. GAUDRON. Approximation diophantienne sur les courbes elliptiques à multiplication complexe. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 337 (Sér. I):629–634, 2003.
- [3] A. BAKER et G. WÜSTHOLZ. Logarithmic forms and group varieties. *J. reine angew. Math.*, 442:19–62, 1993.
- [4] D. BERTRAND. Sous-groupes à un paramètre  $p$ -adique de variétés de groupe. *Invent. Math.*, 40(2):171–193, 1977.
- [5] D. BERTRAND. Approximations diophantiennes  $p$ -adiques sur les courbes elliptiques admettant une multiplication complexe. *Compos. Math.*, 37(1):21–50, 1978.
- [6] D. BERTRAND et Yu. FLICKER. Linear forms on abelian varieties over local fields. *Acta Arith.*, 38(1):47–61, 1980.
- [7] S. BOSCH, W. LÜTKEBOHMERT et M. RAYNAUD. *Néron Models*, volume 21 de *Ergebnisse der Mathematik und ihrer Grenzgebiete*. Springer-Verlag Berlin, 1990.
- [8] J.-B. BOST. Périodes et isogénies des variétés abéliennes sur les corps de nombres (d'après D. Masser et G. Wüstholz). *Séminaire Bourbaki*. Volume 237 d'*Astérisque*, 115–161. Société Mathématique de France, 1996.
- [9] J.-B. BOST. Algebraic leaves of algebraic foliations over number fields. *Publ. Math. Inst. Hautes Études Sci.*, 93:161–221, 2001.
- [10] J.-B. BOST, H. GILLET et C. SOULÉ. Heights of projective varieties and positive Green forms. *J. Amer. Math. Soc.*, 7(4):903–1027, 1994.
- [11] N. BOURBAKI. *Groupes et Algèbres de Lie*. Hermann, Paris, 1972. Fascicule XXXVII.
- [12] J. COATES et S. LANG. Diophantine approximation on Abelian varieties with complex multiplication. *Invent. Math.*, 34(2):129–133, 1976.
- [13] S. DAVID. *Minorations de formes linéaires de logarithmes elliptiques*, volume 62 de *Mémoire de la Société Mathématique de France*. S. M. F., 1995.

- [14] S. DAVID et N. HIRATA-KOHNO. Recent progress on linear forms in elliptic logarithms. Dans *A panorama of number theory or the view from Baker's garden (Zürich, 1999)*, pp. 26–37. Cambridge Univ. Press, Septembre 2002. Éd. par G. Wüstholz.
- [15] S. DAVID et P. PHILIPPON. Minorations des hauteurs normalisées des sous-variétés des tores. *Ann. Scuola Norm. Sup. Pisa Cl. Sci.*, XXVIII(4):489–543, 1999.
- [16] M. DEMAZURE et P. GABRIEL. *Groupes algébriques. Tome 1*. Masson&Cie, North-Holland Publishing Company-Amsterdam, 1970. Avec un appendice *Corps de classes local* par M. Hazewinkel.
- [17] P. DONG. Minorations de combinaisons linéaires de logarithmes  $p$ -adiques de nombres algébriques. *Dissertationes Math. (Rozprawy Mat.)*, 343:97, 1995. Publié par l'Institut de Mathématiques, Académie des Sciences de Pologne.
- [18] N.I. FEL'DMAN. Improved estimate for a linear form of the logarithms of algebraic numbers. *Mat. Sb. (N.S.)*, 77(119):423–436, 1968. Traduction anglaise : *Math. USSR Sb.*, 6 (3), 393 – 406 (1968).
- [19] N.I. FEL'DMAN et Yu.V. NESTERENKO. *Number Theory IV. Transcendental numbers*, volume 44 de *Encyclopaedia of Mathematical Sciences*. Springer-Verlag Berlin, 1998. A.N. Parshin, I.R. Shafarevich (Éds).
- [20] É. GAUDRON. Mesure d'indépendance linéaire de logarithmes dans un groupe algébrique commutatif. Thèse de doctorat de l'université Jean Monnet de Saint-Étienne, décembre 2001. [http://theses-EN-ligne.in2p3.fr/documents/archives0/00/00/11/65/index\\_fr.html](http://theses-EN-ligne.in2p3.fr/documents/archives0/00/00/11/65/index_fr.html)
- [21] É. GAUDRON. Mesures d'indépendance linéaire de logarithmes dans un groupe algébrique commutatif. Prépublication disponible sur <http://www-fourier.ujf-grenoble.fr/~gaudron>, 2002.
- [22] É. GAUDRON. Formes linéaires de logarithmes effectives sur les variétés abéliennes. Prépublication disponible sur <http://www-fourier.ujf-grenoble.fr/~gaudron>, 2004.
- [23] J. GEBEL, A. PETHÖ et H.G. ZIMMER. Computing integral points on elliptic curves. *Acta. Arith.*, 68:171–192, 1994.
- [24] P. GRAFTIEAUX. Formal subgroups of abelian varieties. *Invent. Math.*, 145:1–17, 2001.
- [25] N. HIRATA-KOHNO. Formes linéaires de logarithmes de points algébriques sur les groupes algébriques. *Invent. Math.*, 104:401–433, 1991.
- [26] N. HIRATA-KOHNO. Approximations simultanées sur les groupes algébriques commutatifs. *Compos. Math.*, 86:69–96, 1993.
- [27] S. LANG. *Elliptic curves: Diophantine analysis*, volume 231 de *Grundlehren der Mathematischen Wissenschaften*. Springer-Verlag, Berlin, 1978.
- [28] M. LAURENT. Sur quelques résultats récents de transcendance. *Astérisque*, 198-200:209–230 (1992), 1991. Journées Arithmétiques, 1989 (Luminy, 1989).
- [29] D. MASSER. *Elliptic functions and transcendence*, volume 437 de *Lecture Notes in Maths*. Springer-Verlag, 1975.
- [30] D. MASSER. Linear forms in algebraic points of abelian functions. I.(II.). *Math. Proc. Cambridge Philos. Soc.*, 77 (79):499–513 (55–70), 1975 (1976).
- [31] D. MASSER. Diophantine approximation and lattices with complex multiplication. *Invent. Math.*, 45(1):61–82, 1978.
- [32] E.M. MATVEEV. An explicit lower bound for a homogeneous rational linear form in logarithms of algebraic numbers I. (II.). *Izv. Ross. Akad. NaukSer. Math*, 62, (64)(4, (6)):81–136, (125–180), 1998, (2000).
- [33] Yu.V. NESTERENKO. Estimates for the characteristic function of a prime ideal. *Math. Sb. (N.S.)*, 123(165):11–34, 1984. *Math. USSR. Sbornik*, vol 51 (1985), pp. 9 – 32.
- [34] P. PHILIPPON. Lemme de zéros dans les groupes algébriques commutatifs. *Bull. Soc. Math. France*, 114:355–383, 1986. Errata et Addenda, id.115 (1987).

- [35] P. PHILIPPON. Nouveaux lemmes de zéros dans les groupes algébriques commutatifs. *Rocky Mt. J. Math.*, 26(3):1069–1088, 1996.
- [36] P. PHILIPPON et M. WALDSCHMIDT. Formes linéaires de logarithmes sur les groupes algébriques commutatifs. *Illinois J. Math.*, 32(2):281–314, 1988.
- [37] P. PHILIPPON et M. WALDSCHMIDT. Lower bounds for linear forms in logarithms. *New advances in transcendence theory (Durham, 1986)*, pp. 280–312. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1988.
- [38] P. PHILIPPON et M. WALDSCHMIDT. Formes linéaires de logarithmes simultanées sur les groupes algébriques commutatifs. *Séminaire de Théorie des Nombres Paris 1986–87*, volume 75 de *Progress in Mathematics*, pp. 313–347. Birkhäuser Boston, Inc., 1989. Édité par Catherine Goldstein.
- [39] G. RÉMOND et F. URFELS. Approximation diophantienne de logarithmes elliptiques  $p$ -adiques. *J. Number Theory*, 57(1):133–169, 1996.
- [40] P. ROBBA. Lemmes de Schwarz et lemmes d’approximations  $p$ -adiques en plusieurs variables. *Invent. Math.*, 48:245–277, 1978.
- [41] D. ROY. Interpolation sur des perturbations d’ensembles produits. *Bull. Soc. Math. France*, 130(2):387–408, 2002.
- [42] D. ROY et J.L. THUNDER. An absolute Siegel’s lemma. *J. Reine angew. Math.*, 476:1–26, 1996.
- [43] D. ROY et J.L. THUNDER. Bases of number fields with small height. *Rocky Mountain J. Math.*, 26(3):1089–1098, 1996. Symposium on Diophantine Problems (Boulder, CO, 1994).
- [44] J.-P. SERRE. *Quelques propriétés des groupes algébriques commutatifs*. Astérisque, 1979. Appendice II de [47].
- [45] N.P. SMART. *The Algorithmic Resolution of Diophantine Equations*, volume 41 de *Student Texts*, London Mathematical Society. Cambridge University Press, 1998.
- [46] R.J. STROEKER et N. TZANAKIS. Computing all integer solutions of a general elliptic equation. Dans *ANTS-IV*, volume 1838 de *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 551–561. Springer-Verlag, 2000. W. Bosma (Ed).
- [47] M. WALDSCHMIDT. *Nombres transcendants et groupes algébriques*, volume 69/70 d’*Astérisque*. Société Mathématique de France, 1979.
- [48] M. WALDSCHMIDT. A lower bound for linear forms in logarithms. *Acta Arith.*, 37:257–283, 1980.
- [49] M. WALDSCHMIDT. *Diophantine Approximation On Linear Algebraic Groups*, volume 326 de *Grundlehren der mathematischen Wissenschaften*. Springer-Verlag, 2000.
- [50] M. WALDSCHMIDT. Linear independence measures for logarithms of algebraic numbers. *Diophantine approximation (Cetraro, 2000)*, volume 1819 de *Lecture Notes in Math.*, pp. 250–344. Springer, Berlin, 2003.
- [51] G. WÜSTHOLZ. A new approach to Baker’s theorem on linear forms in logarithms. III. *New advances in transcendence theory (Durham, 1986)*, pp. 399–410. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1988.
- [52] G. WÜSTHOLZ. Multiplicity estimates on group varieties. *Ann. of Math. (2)*, 129(3):471–500, 1989.
- [53] K. YU. Linear forms in  $p$ -adic logarithms. III. *Compos. Math.*, 91(3):241–276, 1994.
- [54] K. YU.  $p$ -adic logarithmic forms and group varieties. I. *J. Reine angew. Math.*, 502:29–92, 1998.
- [55] K. YU.  $p$ -adic logarithmic forms and group varieties. II. *Acta Arith.*, 89(4):337–378, 1999.
- [56] S. ZHANG. Positive line bundles on arithmetic varieties. *J. Amer. Math. Soc.*, 8(1):187–221, 1995.

Université Grenoble I, Institut Fourier.

UMR 5582, BP 74

38402 Saint-Martin-d'Hères Cedex, France.

Courriel : [Eric.Gaudron@ujf-grenoble.fr](mailto:Eric.Gaudron@ujf-grenoble.fr)

Page internet : <http://www-fourier.ujf-grenoble.fr/~gaudron>