

*Le programme de Hilbert  
en algèbre commutative*

**Conférence en l'honneur de Jean-Luc Chabert  
Amiens 13 décembre 2012**

H. Lombardi, Besançon

Henri.Lombardi@univ-fcomte.fr, <http://hlombardi.free.fr>

ces transparents : <http://hlombardi.free.fr/publis/Chabert2012Slides.pdf>

Pour imprimer ces transparents :

<http://hlombardi.free.fr/publis/Chabert2012Doc.pdf>

Pour plus de détails :

<http://hlombardi.free.fr/publis/Plaidoyer.pdf>

*L'invention de la droite réelle  
par Cantor et Dedekind*

Il s'agit d'un coup de force étonnant.

Que sont et que doivent être les nombres réels ?, dit Dedekind.

Dedekind prétend être le premier à démontrer  $\sqrt{2} \cdot \sqrt{3} = \sqrt{6}$

Pourtant Archimède savait le démontrer.

Alors qu'est-ce qui a changé ?

*L'invention de la droite réelle, suite*

L'autorisation d'utiliser librement les « infinis actuels » permet à Dedekind et Cantor de définir un nombre réel en toute généralité.

On voit que la définition de Dedekind utilise l'ensemble  $\mathcal{P}(\mathbb{Q})$  et celle de Cantor  $\mathbb{Q}^{\mathbb{N}}$ .

Ce n'est plus la géométrie qui justifie intuitivement l'analyse, c'est l'analyse qui justifie la géométrie (via le calcul sur les coordonnées).

Et l'analyse semble avoir été réduite à l'arithmétique grâce à l'autorisation donnée aux ensembles infinis

*L'appréciation de Poincaré*

La Science et l'Hypothèse. Chapitre II.

La grandeur mathématique et l'expérience.

Avant d'aller plus loin, faisons une première remarque. Le continu ainsi conçu n'est plus qu'une collection d'individus rangés dans un certain ordre, en nombre infini, il est vrai, mais *extérieurs* les uns aux autres. Ce n'est pas là la conception ordinaire, où l'on suppose entre les éléments du continu une sorte de lien intime qui en fait un tout, où le point ne préexiste pas à la ligne, mais la ligne au point. De la célèbre formule, le continu est l'unité dans la multiplicité, la multiplicité seule subsiste, l'unité a disparu. Les analystes n'en ont pas moins raison de définir leur continu comme ils le font, puisque c'est toujours sur celui-là qu'ils raisonnent depuis qu'ils se piquent de rigueur. Mais c'est assez pour nous avertir que le véritable continu mathématique est tout autre chose que celui des physiciens et celui des métaphysiciens.

*Les paradoxes :  
des infinis trop grands !*

L'univers mathématique de Cantor est trop grand pour être lui-même un ensemble (le cardinal de l'univers est plus grand que tous les autres, mais tout cardinal  $c$  est strictement plus petit que le cardinal de  $\mathcal{P}(c)$ ).

Cantor pensait pouvoir définir un ensemble simplement en disant quelle propriété satisfont ses éléments.

Borel, Lebesgue, Brouwer, Poincaré, Hermann Weyl refuseront de considérer que les ensembles à la Cantor puissent être un fondement fiable pour les mathématiques.

Pour eux, même  $\mathcal{P}(\mathbb{N})$  et  $\mathcal{P}(\mathbb{R})$  ne sont pas acceptables.

---

page 6

*Poincaré sur le cantorisme*

J'ai parlé plus haut du besoin que nous avons de remonter sans cesse aux premiers principes de notre science et du profit qu'en peut tirer l'étude de l'esprit humain. C'est ce besoin qui a inspiré deux tentatives qui ont tenu une très grande place dans l'histoire la plus récente des mathématiques. La première est le cantorisme, qui a rendu à la science les services que l'on sait. Cantor a introduit dans la science une manière nouvelle de considérer l'infini mathématique . . . .

Un des traits caractéristiques du cantorisme, c'est qu'au lieu de s'élever au général en bâtissant des constructions de plus en plus compliquées et de définir **par construction**, il part du **genus supremum** et ne définit, comme auraient dit les scolastiques, que per **genus proximum et differentiam specificam**.

---

page 7

*Poincaré sur le cantorisme, suite*

De là l'horreur qu'il a quelquefois inspirée à certains esprits, à Hermite par exemple, dont l'idée favorite était de comparer les sciences mathématiques aux sciences naturelles.

Chez la plupart d'entre nous ces préventions s'étaient dissipées, mais il est arrivé qu'on s'est heurté à certains paradoxes, à certaines contradictions apparentes, qui auraient comblé de joie Zénon d'Élée et l'école de Mégare. Et alors chacun de chercher le remède . . .

**Quel que soit le remède adopté, nous pouvons nous promettre la joie du médecin appelé à suivre un beau cas pathologique.**

in : l'avenir des mathématiques, 1908

---

page 8

*Poincaré et les axiomes de Zermelo*

M. Zermelo a voulu construire un système impeccable d'axiomes ; mais ces axiomes ne peuvent être regardés comme des décrets arbitraires, puisqu'il faudrait montrer que ces décrets ne sont pas contradictoires, et qu'ayant fait entièrement table rase on n'a plus rien sur quoi l'on puisse appuyer une semblable démonstration. Il faut donc que ces axiomes soient évidents par eux-mêmes.

Or quel est le mécanisme par lequel on les a construits ? on a pris des axiomes qui sont vrais des collections finies ; on ne pouvait les étendre tous aux collections infinies, on n'a fait cette extension que pour un certain nombre d'entre eux, choisis plus ou moins arbitrairement.

A mon sens d'ailleurs [...] aucune proposition concernant les collections infinies ne peut être évidente par définition.

in : la logique de l'infini, 1909

---

page 9

## *Le programme de Poincaré*

Quant à moi je proposerais de s'en tenir aux règles suivantes :

1. Ne jamais envisager que des objets susceptibles d'être définis en un nombre fini de mots ;
2. Ne jamais perdre de vue que toute proposition sur l'infini doit être la traduction, l'énoncé abrégé de propositions sur le fini ;
3. Éviter les classifications et les définitions non prédictives.

in : la logique de l'infini, 1909

---

— page 10 —

## *Le programme de Hilbert*

Hilbert tient les critiques de Brouwer et Poincaré pour sérieuses. Mais ce qui lui importe, c'est avant tout de faire des mathématiques. Or, dit-il, les mathématiques sont plus faciles à faire dans le paradis de Cantor que dans l'enfer de Brouwer.

Hilbert tient le langage suivant : finalement peu nous importe de savoir si les infinis actuels existent ou non, si l'hypothèse du continu a un sens ou si elle n'en a pas ; ce qui nous importe, c'est de savoir si, en utilisant la théorie des ensembles infinis, on est assuré de ne jamais démontrer des énoncés qui ont du sens mais qui seraient faux.

C'est exactement la même attitude que vis à vis des nombres imaginaires qui servent à trouver la racine réelle d'une équation du troisième degré : l'important est avant tout que, une fois le calcul terminé, et les nombres imaginaires évaporés, le résultat soit juste.

---

— page 11 —

## *Le programme de Hilbert, suite*

Autrement dit, si l'on pouvait réduire l'infini mathématique à n'être qu'une manière de parler, on serait pleinement satisfaits.

A défaut de pouvoir élucider **la sémantique** des ensembles infinis, essayons au moins de comprendre **leur syntaxe** : comprendre ce que l'on fait exactement quand on les utilise en mathématiques.

Cette position de repli peut sembler effarante, car elle consiste à arithmétiser les mathématiques d'une façon radicale : l'étude d'une théorie formelle, n'est rien d'autre que l'étude d'une unique fonction primitive récursive de  $\mathbb{N}$  dans  $\mathbb{N}$  : celle qui énumère les numéros des théorèmes de la théorie.

---

— page 12 —

## *L'échec du programme de Hilbert*

### **Les théorèmes d'incomplétude de Gödel**

- 1) Aucune théorie formelle ne peut décrire complètement le plus simple des infinis :  $\mathbb{N}$ .
- 2) Pour démontrer qu'une théorie formelle suffisamment expressive est consistante, on a besoin de méthodes de démonstration plus puissantes que celles codifiées dans la théorie formelle.

---

— page 13 —

## *Les vertus du programme de Hilbert*

- 1) Un nouveau domaine des mathématiques : la logique mathématique
- 2) Cela conduit par exemple à une clarification décisive, due à Brouwer et Heyting : la distinction nette entre la logique des mathématiques constructives (la logique intuitionniste) et la logique classique, qui accepte une idée de vérité absolue a priori : toute propriété sensée est vraie ou fausse dans l'absolu (principe du tiers exclu).
- 3) La volonté de trouver une façon convaincante de justifier les idéalités cantorienne.

---

— page 14 —

## *L'analyse constructive à la Bishop*

Dans **Foundations of Constructive Analysis** (1967), Errett Bishop développe une version constructive de la théorie des ensembles, avec laquelle il réalise un nouveau type de programme de Hilbert.

Il démontre dans un cadre entièrement constructif l'essentiel des théorèmes qui fondent l'analyse réelle et complexe (ce que l'on enseigne aujourd'hui jusqu'au Master).

Il s'agit d'un **cadre mathématique minimaliste** parce que les démonstrations sont acceptables aussi bien par un mathématicien classique que par toutes les variantes des mathématiques constructives.

En algèbre : Mines R., Richman F., Ruitenburg W. **A Course in Constructive Algebra**. Universitext. Springer-Verlag, (1988).

---

— page 15 —

### *Le nouveau programme de Hilbert*

D'une certaine manière, il s'agit de réaliser le programme de Poincaré (tout ramener au fini) mais en tenant compte des progrès réalisés au moyen des méthodes abstraites héritières de Cantor et Hilbert.

Tout en continuant le travail déjà accompli par Bishop, Brouwer, Richman et bien d'autres, nous pensons disposer d'une méthode assez générale de décryptage des démonstrations abstraites lorsqu'elles aboutissent à des résultats de nature concrète.

**A logical approach to abstract algebra.** Coquand T., Lombardi H. (survey) Math. Struct. in Comput. Science **16** (2006), 885–900.

**Algèbre Commutative, Méthodes Constructives.** Lombardi H., Quitté C. Calvage & Mounet, (2011).

---

— page 16 —

### *Le nouveau programme de Hilbert, suite*

L'idée générale est que le **programme de Hilbert pour l'algèbre abstraite** est tout à fait réalisable, selon les lignes qui suivent.

Les objets idéaux de l'algèbre abstraite, inaccessibles d'un point de vue constructif, doivent être remplacés par des spécifications incomplètes de ces mêmes objets.

Les démonstrations abstraites concernant les objets idéaux peuvent alors être relues comme des démonstrations concrètes concernant leurs spécifications incomplètes.

---

— page 17 —

### *Le nouveau programme de Hilbert, suite*

Par exemple plutôt que considérer le spectre de Zariski d'un anneau, on considère le treillis de ses ouverts quasi-compacts, qui est un objet "concret" car il s'identifie à l'ensemble des radicaux d'idéaux de type fini.

Notons  $D_{\mathbf{A}}(I) = \sqrt[I]{I}$  le radical de l'idéal  $I$  dans l'anneau  $\mathbf{A}$ .

Les idéaux  $D_{\mathbf{A}}(I)$  pour les  $I$  de type fini forment ce que l'on appelle le **treillis de Zariski de l'anneau  $\mathbf{A}$** . C'est un treillis distributif dont l'espace dual est le fameux **spectre de Zariski  $\text{Spec}(\mathbf{A})$**  (qui hante les mathématiques classiques).

Pour le moment, la possibilité de réaliser le programme de Hilbert en algèbre selon ces lignes est **un fait purement expérimental**, mais qui reçoit régulièrement de nouvelles confirmations.

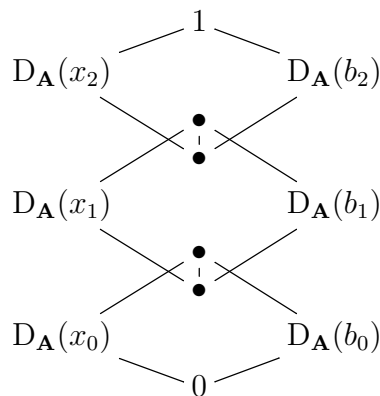
---

— page 18 —

### *La théorie de Galois dynamique*



Notez que  $D_{\mathbf{A}}(xy) = D_{\mathbf{A}}(x) \vee D_{\mathbf{A}}(y)$  et  $D_{\mathbf{A}}(x, y) = D_{\mathbf{A}}(x) \wedge D_{\mathbf{A}}(y)$ .




---

page 22

### *La dimension de Krull, 4*

Dans les trois transparents qui suivent, nous donnons des théorèmes non noëthériens dus à Heitmann (1984). Grâce à notre définition constructive de la dimension de Krull, nous avons pu en donner des preuves constructives qui permettent de réaliser ces théorèmes au moyen d'algorithmes explicites.

---

page 23

### *La dimension de Krull, Kronecker*

**Théorème de Kronecker-Heitmann, avec la dimension de Krull, non noëthérien**

1. Soit  $n \geq 0$ . Si  $\text{Kdim } \mathbf{A} < n$  et  $b_1, \dots, b_n \in \mathbf{A}$ , il existe  $x_1, \dots, x_n$  tels que pour tout  $a \in \mathbf{A}$ ,  $D_{\mathbf{A}}(a, b_1, \dots, b_n) = D_{\mathbf{A}}(b_1 + ax_1, \dots, b_n + ax_n)$ .
2. En conséquence, dans un anneau de dimension de Krull  $\leq n$ , tout idéal de type fini a même nilradical qu'un idéal engendré par au plus  $n + 1$  éléments.

---

page 24

### *La dimension de Krull, Splitting off*

Nous disons qu'une matrice  $F$  est **de rang**  $\geq k$  lorsque l'idéal  $\mathcal{D}_k(F)$  engendré par ses mineurs d'ordre  $k$  est égal à  $\langle 1 \rangle$ .

**Théorème splitting off de Serre, version non noëthérienne avec la dimension de Krull**

Soit  $k \geq 1$  et  $M$  un  $\mathbf{A}$ -module projectif de rang  $\geq k$ , (resp. isomorphe à l'image d'une matrice de rang  $\geq k$ ).

Supposons que  $\text{Kdim } \mathbf{A} < k$ . Alors  $M \simeq N \oplus \mathbf{A}$  pour un certain module  $N$  projectif de rang  $\geq k - 1$  (resp. isomorphe à l'image d'une matrice de rang  $\geq k - 1$ ).

---

page 25

### *La dimension de Krull Théorème de Forster*

Nous disons qu'un module de type fini, engendré par le système générateur  $(y_1, \dots, y_{\ell+t})$  est **localement engendré par  $\ell$  éléments** s'il existe une matrice de relations de rang  $\geq t$  pour ce système générateur.

**Théorème de Forster, version non noëthérienne avec la dimension de Krull**

Soit  $k \geq 0$  et  $r \geq 1$ . Si  $\text{Kdim } \mathbf{A} \leq k$ , et si un  $\mathbf{A}$ -module de type fini  $M$  est localement engendré par  $r$  éléments, alors il est engendré par  $k + r$  éléments.

Plus précisément, si  $M$  est engendré par  $y_1, \dots, y_{k+r+s}$ , on peut calculer  $z_1, \dots, z_{k+r}$  dans  $\langle y_{k+r+1}, \dots, y_{k+r+s} \rangle$  tels que  $M$  soit engendré par  $y_1 + z_1, \dots, y_{k+r} + z_{k+r}$ .

---

page 26

## La dimension du spectre maximal

Les théorèmes précédents, établis originellement dans le cas noëthérien avec la dimension de Krull, ont été généralisés par Swan (dans le cas noëthérien) avec la dimension du spectre maximal.

En ce qui concerne la dimension du spectre maximal, Heitmann a remarqué en 1984 que celle-ci intervenait dans la littérature uniquement dans le cas noëthérien. Il a proposé de la remplacer, dans le cas général, par la dimension de l'espace spectral suivant :  $\mathbf{Jspec}(\mathbf{A})$  est le plus petit sous-espace spectral de  $\mathbf{Spec}(\mathbf{A})$  contenant le spectre maximal, autrement dit l'adhérence du spectre maximal, pour la topologie constructible, dans  $\mathbf{Spec}(\mathbf{A})$ , munie de la topologie induite par  $\mathbf{Spec}(\mathbf{A})$ . On note  $\mathbf{Jdim}(\mathbf{A})$  la dimension de l'espace spectral défini par Heitmann.

Lorsque l'anneau est noëthérien le spectre maximal est un espace spectral et coïncide avec  $\mathbf{Jspec}(\mathbf{A})$ .

---

page 27

## La dimension de $\mathbf{Jspec}(\mathbf{A})$

De même que la dimension de Krull est la dimension du treillis distributif formé par les radicaux d'idéaux de type fini, on peut démontrer que la  $\mathbf{Jdim}$  est la dimension du treillis distributif formé par les radicaux de Jacobson d'idéaux de type fini.

En mathématiques classiques, le radical de Jacobson  $\mathbf{J}_{\mathbf{A}}(I)$  d'un idéal  $I$  est défini comme l'intersection des idéaux maximaux qui contiennent  $I$ .

Une définition constructivement acceptable est

$$\mathbf{J}_{\mathbf{A}}(I) := \{x \in \mathbf{A} \mid \forall y \in \mathbf{A}, 1 + xy \in (\mathbf{A}/I)^{\times}\}.$$

Le radical de Jacobson de  $\mathbf{A}$  est l'idéal  $\mathbf{J}_{\mathbf{A}}(0)$ .

Ceci permet de donner une définition constructivement acceptable de la  $\mathbf{Jdim}$ . C'est la dimension du treillis distributif formé par les  $\mathbf{J}_{\mathbf{A}}(I)$  pour les  $I$  de type fini.

---

page 28

## La dimension de Heitman

Heitmann a réussi à généraliser pour la  $\mathbf{Jdim}$ , dans le cadre non noëthérien, certains théorèmes établis avec la  $\mathbf{Kdim}$ .

C'est seulement T. Coquand (avec l'aide de L.H. et Q.C.) qui a réussi à généraliser les théorèmes de Serre et Forster pour la  $\mathbf{Jdim}$ . Pour cela il a été nécessaire d'inventer une nouvelle dimension.

**Définition.** On définit  $\mathbf{Hdim}(\mathbf{A})$  par récurrence comme suit.

- $\mathbf{Hdim}(\mathbf{A}) = -1$  si et seulement si  $\mathbf{A}$  est trivial.
- Pour  $\ell \geq 0$ ,  $\mathbf{Hdim}(\mathbf{A}) \leq \ell$  si et seulement si pour tout  $x \in \mathbf{A}$ ,  $\mathbf{Hdim}(\mathbf{A}/J_x) \leq \ell - 1$  où  $J_x = \langle x \rangle + (\mathbf{J}_{\mathbf{A}}(0) : x)$   
(on a  $(\mathbf{J}_{\mathbf{A}}(0) : x) = \{y \in \mathbf{A} \mid \forall z \in \mathbf{A}, 1 + xyz \text{ est inversible}\}$ ).

---

page 29

## Le théorème de Quillen-Suslin

Ce théorème, parfois appelé **conjecture de Serre** affirme qu'un module projectif de type fini sur un anneau de polynômes à coefficients dans un **corps** est libre.

De manière équivalente et plus terre à terre, toute matrice idempotente d'ordre  $n$  (sur un

tel anneau) est semblable à une matrice de projection canonique  $I_{k,n}$  pour un certain  $k$ .

$$I_{k,n} = \begin{array}{|c|c|} \hline I_k & 0_{k,p} \\ \hline 0_{p,k} & 0_{p,p} \\ \hline \end{array} \quad (p+k=n).$$

---

page 30

### *Le théorème de Quillen-Suslin*

La démonstration de Quillen étend le résultat au cas d'un **anneau principal**.

Plus tard, le résultat a été étendu aux **anneaux de Bezout intègres de dimension**  $\leq 1$  (Brewer&Costa, Maroscia).

Enfin le résultat a été étendu à **tous les anneaux de Bezout intègres** (théorèmes de Bass pour  $\mathbf{V}[X]$  lorsque  $\mathbf{V}$  est un anneau de valuation de dimension de Krull finie, puis de Lequain-Simis).

---

page 31

### *Le théorème de Quillen-Suslin, 2*

Des algorithmes pour le théorème de Quillen-Suslin sont parus dans la littérature du Calcul Formel pour le cas des corps, voire pour le cas des anneaux principaux. Ils sont en général basés sur la démonstration de Suslin.

Ces algorithmes utilisent des bases de Gröbner et fonctionnent grâce à la noetherianité. Nos méthodes de décryptage nous ont permis au contraire de donner des preuves constructives (et donc des algorithmes) pour toutes les versions, sans jamais utiliser d'hypothèse de type noethérien. Pour cela il a fallu décrypter l'induction de Quillen et l'induction de Lequain-Simis.

---

page 32

### *Le Quillen patching*

#### **Théorème de recollement de Vaserstein, version constructive**

Soit  $G$  une matrice sur  $\mathbf{A}[X]$  et  $S_1, \dots, S_n$  des monoïdes comaximaux de  $\mathbf{A}$ . Les matrices  $G(X)$  et  $G(0)$  sont équivalentes sur  $\mathbf{A}[X]$  si et seulement si elles sont équivalentes sur  $\mathbf{A}_{S_i}[X]$  pour chaque  $i$ .

#### **Théorème de recollement de Quillen, version constructive**

Soit  $M$  un module de présentation finie sur  $\mathbf{A}[X]$  et  $S_1, \dots, S_n$  des monoïdes comaximaux de  $\mathbf{A}$ . Alors,  $M$  est un module étendu depuis  $\mathbf{A}$  si et seulement si chaque  $M_{S_i}$  est étendu depuis  $\mathbf{A}_{S_i}$ .

---

page 33

### *La méthode locale-globale constructive*

Ces versions constructives, dans lesquelles la **localisation en un système de monoïdes comaximaux** (ou d'éléments comaximaux) *remplace* la **localisation en tous les idéaux premiers**, est une illustration de la méthode dite locale-globale constructive.



En fait la version constructive remplace plutôt la localisation **au voisinage de tous les idéaux premiers** (rarement évoquée mais plus pertinente).

Non seulement la localisation en un système d'éléments comaximaux marche mieux que la localisation en tous les idéaux premiers, mais surtout, c'est la version qui permet de passer des schémas affines aux schémas généraux dans la théorie de Grothendieck.

---

— page 34 —

### *Les résolutions libres finies*

La théorie des résolutions libres finies est une théorie qui étudie les suites exactes de matrices :

$$L_{\bullet} : 0 \rightarrow L_m \xrightarrow{A_m} L_{m-1} \xrightarrow{A_{m-1}} \dots \xrightarrow{A_2} L_1 \xrightarrow{A_1} L_0, \quad L_k = \mathbf{A}^{p_k}.$$

Ici,  $A_k$  est une matrice  $\in \mathbb{M}_{p_{k-1}, p_k}(\mathbf{A})$ . On a  $\text{Im}(A_k) = \text{Ker}(A_{k-1})$  pour  $k = m, \dots, 1$ .

On est intéressé par les propriétés des matrices  $A_k$  ainsi que par la structure du  $\mathbf{A}$ -module  $M = \text{Coker}(A_1) = L_0 / \text{Im}(A_1)$  (la suite exacte ci-dessus constitue une résolution libre finie de ce module).

Un très bon livre de référence sur le sujet est le livre de Northcott **Finite Free Resolutions**. Il reste néanmoins dans cet ouvrage de nombreuses démonstrations très abstraites et non constructives.

---

— page 35 —

### *Les résolutions libres finies, 2*

Comme le sujet en lui-même est basé sur des objets tout à fait concrets, on pouvait s'attendre à ce qu'une version constructive convenable de la théorie puisse être écrite sans trop s'écarter du texte original de Northcott.

Les outils nécessaires (notamment des définitions constructivement acceptables pour les concepts essentiels de la théorie) ont été mis au point et utilisés pour démontrer tous les théorèmes essentiels du livre de Northcott dans l'article suivant :

**Constructive finite free resolutions.**

Coquand T., Quitté C. *Manuscripta Math.*, **137**, (2012), 331–345.

On peut consulter une synthèse en

<http://hlombardi.free.fr/publis/ACMC-FFR>.

---

— page 36 —

### *L'anneau des polynômes à valeurs entières*

La méthode locale-globale constructive peut être utilisée pour donner une version algorithmique du théorème qui affirme que l'anneau des polynômes à valeurs entières sur  $\mathbb{Z}$  est un anneau de Prüfer.

Autrement dit, en décryptant la démonstration classique, qui utilise le fait que la localisation en un idéal maximal est toujours un anneau de valuation, on est capable de produire un algorithme pour inverser un idéal  $\langle f, g \rangle$  arbitraire de l'anneau.

On peut consulter à ce sujet

<http://hlombardi.free.fr/publis/PruferPVE>.

---

— page 37 —

*Merci de votre attention*