ACCQ 205 - Courbes algébriques

1 Corps et extensions de corps

Anneaux, algèbres, corps, idéaux premiers et maximaux et corps des fractions

On considère les anneaux commutatifs sauf précision contraire.

Def. Soit k un anneau. Une k-**algèbre** (commutative) est un anneau A muni d'un morphisme d'anneaux $\varphi_A : k \to A$, appelé **morphisme structural** de l'algèbre, dont l'image est contenue dans le centre de A.

Formellement une k-algèbre est le couple (A, φ_A) mais on le réduit souvent à la donnée de φ_A. De façon équivalente une k-algèbre est un k-module qui est muni d'une multiplication k-bilinéaire qui en fait un anneau.

Def. Un **morphisme de** k-**algèbres** est un morphisme d'anneaux $\psi : A \to B$ tel que $\varphi_B = \psi \circ \varphi_A$. Ce sont aussi les applications k linéaires qui préservent la multiplication.

Rem. Une $\mathbf{Z}$-algèbre est exactement la même chose qu'un anneau.

En pratique k est généralement un corps et A est donc un k-ev muni d'une multiplication k-bilinéaire qui en fait un anneau.

Def. Un élément a d'un anneau A est dit **régulier** si $x \mapsto ax$ est injectif, i.e. $ax = 0 \implies x = 0$ (il est inversible si bijectivité de l'application). A est dit **intègre** si tous les éléments sauf 0 sont réguliers, i.e. $0 \neq 1$ et $\forall a, b \in A \setminus \{0\}, ab = 0 \implies a = 0$ ou $b = 0$. Par convention l'anneau nul n'est pas intègre.

Def. Un idéal $\mathfrak{p}$ d'un anneau A est dit **premier** lorsque l'anneau quotient $A/\mathfrak{p}$ est intègre, i.e. $\mathfrak{p} \neq A$ et $\forall a, b \in A, ab \in \mathfrak{p} \implies a \in \mathfrak{p}$ ou $b \in \mathfrak{p}$.

Prop. Dans un anneau A, l'ensemble $A^\times$ des inversibles est un groupe, aussi appelé groupe des **unités de** A.

Def. Un **corps** est un anneau k dans lequel $k^\times = k \setminus \{0\}$. C'est équivalent à dire que k a deux idéaux qui sont $\{0\}$ et lui-même. C'est en particulier un anneau intègre. Par convention l'anneau nul n'est pas un corps.

Def. Un idéal $\mathfrak{m}$ d'un anneau A est dit **maximal** si $A/\mathfrak{m}$ est un corps. De façon équivalente $\mathfrak{m} \neq A$ et $\mathfrak{m}$ est maximal pour l'inclusion parmi les idéaux différents de A.

Prop. Un idéal maximal est premier.

Ex. Dans un anneau factoriel A, un idéal de la forme (f) avec $f \in A$ est premier ssi f est nul ou irréductible.

Lem (Principe maximal de Hausdorff)**.** Soit $\mathcal{F} \subset \mathcal{P}(A)$ non vide et tel que, pour tout partie $\mathcal{I} \subset \mathcal{F}$ non vide totalement ordonnée par l'inclusion, $\exists F \in \mathcal{F}, \bigcup_{i \in \mathcal{I}} I \subset F$. Alors il existe $M \in \mathcal{F}$ maximal pour l'inclusion.

Prop. Dans un anneau A, tout idéal strict (autre que A) est inclus dans un idéal maximal.

Def. Un élément x d'un anneau A est dit **nilpotent** lorsque $\exists n \in \mathbf{N}, x^n = 0$. Si 0 est le seul élément nilpotent, A est dit réduit.

Prop. Dans un anneau, l'ensemble des éléments nilpotents est un idéal appelé **nilradical** de l'anneau. C'est aussi l'intersection des idéaux premiers de l'anneaux. Le quotient de l'anneau par son nilradical est réduit.

Def. Soit A un anneau intègre. On définit le **corps des fractions** de A, $\mathrm{Frac}(A) = \left\{ \frac{a}{q} \mid a \in A, q \in A \setminus \{0\} \right\}$ en convenant d'identifier $\frac{a}{q}$ avec $\frac{a'}{q'}$ lorsque $aq' = a'q$.

Prop. Soit A un anneau intègre, K un corps et $\varphi : A \to K$ un morphisme d'anneau injectif. Alors il existe un unique morphisme de corps $\hat{\varphi} : \mathrm{Frac}(A) \to K$ qui prolonge φ et il est donné par $\hat{\varphi}\left(\frac{a}{q}\right) = \frac{\varphi(a)}{\varphi(q)}$.

Def. Le corps des fractions de l'anneau des polynômes $k[t_1, \dots, t_n]$ est appelé corps des **fractions rationnelles** et noté $k(t_1, \dots, t_n)$.

Prop. Soit k un corps et K une k-algèbre de dimension finie intègre. Alors K est un corps.

Lem (de Gauß)**.** Soit A un anneau factoriel et K son corps des fractions. Alors :

(i) $A[t]$ est factoriel,

(ii) $f \in A[t]$ est irréductible ssi f est constant et irréductible dans A, ou bien f est primitif, i.e. irréductible dans $K[t]$ et le pgcd dans A de ses coefficients vaut 1.

Algèbres engendrée, extensions de corps

2 Le Nullstellensatz et les fermés de Zariski

Anneaux nothérien

Def. Un idéal I d'un anneau A est de **type fini** s'il est engendré par un nombre fini d'éléments (équivalent à être de type fini en tant que sous-module de A).

Def. Un anneau A est dit **noethérien** lorsque tout idéal I de A est de type fini.

Rem. Un quotient d'un anneau noethérien est noethérien.

Th (de la base de Hilbert)**.** Si A est un anneau noethérien, alors l'anneau $A[t]$ des polynômes à une indéterminée sur A est noethérien.

Cor. Soit k un corps ou un anneau noethérien. Alors l'anneau $k[t_1,\dots,t_n]$ des polynômes en n indéterminées sur k est un anneau noethérien, et plus généralement toute k-algèbre de type fini (comme k-algèbre) $k[x_1,\dots,x_n]$ est un anneau noethérien.

Idéaux maximaux d'anneaux de polynômes

Lem. Soit k un corps algébriquement clos et K une extension. On suppose que $h_1,\dots,h_m \in k[t_1,\dots,t_n]$ ont un zéro commun dans K (i.e $\exists z_1,\dots,z_n \in K, \forall i, h_i(z_1,\dots,z_n = 0)$. Alors ils en ont un dans k.

Not. Soit k un corps et $(x_1,\dots,x_n) \in k^n$. On note

$$\mathfrak{m}_{(x_1,\dots,x_n)} := \{f \in k[t_1,\dots,t_n] \mid f(x_1,\dots,x_n) = 0\} = (t_1 - x_1,\dots,t_n - x_n)\,.$$

Prop. Soit k un corps algébriquement clos. Les idéaux maximaux de $k[t_1,\dots,t_n]$ sont exactement les idéaux $\mathfrak{m}_{(x_1,\dots,x_n)}$.

Prop (lemme de Zariski)**.** Soit k un corps et K une extension de type fini comme k-algèbre. Alors k est en fait une extension finie.

Le Nullstellensatz

Prop (Nullstellensatz faible)**.** Soient $h_1,\dots,h_m \in k[t_1,\dots,t_n]$ avec k algébriquement clos. Si $h_1,\dots,h_m$ n'engendrent pas l'idéal unité, alors ils ont un zéro commun dans k : $\exists x_1,\dots,x_n \in k, \forall i, h_i(x_1,\dots,x_n) = 0$.

Prop (Nullstellensatz fort)**.** Soient $g, h_1,\dots,h_m \in k[t_1,\dots,t_n]$ avec k algébriquement clos. Si g s'annule sur tous les zéros commun de $h_1,\dots,h_m$ alors $\exists l \in \mathbf{N}, g^l \in (h_1,\dots,h_m)$ (idéal engendré).

Fermés de Zariski

Def. Un idéal $\mathfrak{r}$ d'un anneau A est dit **radical** lorsque $A/\mathfrak{r}$ est réduit, i.e $\forall x \in A, \forall n \in \mathbf{N}, x^n \in \mathfrak{r} \implies x \in \mathfrak{r}$.

Un idéal premier, et a fortiori un idéal maximal, est en particulier un idéal radical.

Dans ce qui suit on note k un corps et k^{alg} une clôture algébrique.

Not. Soit $\mathscr{F} \subset k[t_1,\dots,t_n]$. On pose $Z(\mathscr{F}) := \{(x_1,\dots,x_d) \in (k^{\text{alg}})^d \mid \forall f \in \mathscr{F}, f(x_1,\dots,x_d) = 0\}$.

Def. On appelle **fermé de Zariski** tout ensemble de la forme $Z(\mathscr{F})$.

Rem. Z est décroissante pour l'inclusion et on peut toujours supposer que $\mathscr{F}$ est un idéal radical.

Def. Un fermé de Zariski de la forme $Z(f) = Z(\{f\})$ est appelé une **hypersurface**.

Rem. Le vide, $(k^{\text{alg}})^d$ et les singletons sont des fermés de Zariski.

Not. Soit $E \subset (k^{\text{alg}})^d$. On pose $\mathfrak{J}(E) := \{f \in k[t_1,\dots,t_n] \mid \forall (x_1,\dots,x_d) \in E, f(x_1,\dots,x_d) = 0\}$.

Rem. $\mathfrak{J}(E)$ est un idéal radical, $\mathfrak{J}$ est décroissant pour l'inclusion et $\mathfrak{J}(E) = \bigcap_{x\in E} \mathfrak{M}_x$ où $\mathfrak{M}_x = \mathfrak{J}(\{x\})$.

3 Corps de courbes algébriques

Définitions

Def. Soit k un corps. Un **corps de fonctions** K de dimension n sur k est une extension de corps de k de type fini et de degré de transcendance n sur k. Pour $n = 1$ on parle de **corps de fonctions de courbe** sur k.

Par abus de langage on dit que K est une courbe (algébrique) sur k.

Def. **Droite projective** sur k, notée $\mathbf{P}^1_k$ ou $\mathbf{P}^1$: courbe simple donnée par $k(t)$ le corps des fractions rationnelles.

...

Anneaux de valuation

Def. Soit K un corps. Un **anneau de valuation** de K est un sous-anneau R de K vérifiant $\forall x \in K, x \in R$ ou $x^{-1} \in R$. Il est dit non-trivial si $R \neq K$. Lorsque $k \subset R$ est un sous-corps de K, on dit que R est un anneau de valuation au-dessus de k.

Rem. R est intègre et $K = \operatorname{Frac}(R) \longrightarrow$ on parle d'anneau de valuation dans l'absolu pour un anneau de valuation de son corps des fractions.

Def. Soit $x, y \in K$. On dit que :

- x est *plus valué* que y si $\exists z \in R, x = yz$,
- x et y ont la *même valuation* si $\exists z \in R^\times, x = yz$.

Ceci définit une relation d'équivalence dont les classes sont appelées **valuations** et notées $v_R(x)$ ou $v(x)$. On note $v(0) = \infty$ mais cette classe est mise à part et on ne considère généralement pas qu'il s'agisse d'une valuation.

Rem. On a défini une relation d'ordre total sur les valuations (plus ∞ qui est le plus grand élément).

Not. On définit $v(x)+v(y)=v(xy)$ et $\forall c \in R^\times, v(c)=v(1)=0$.

Def. Soit $\Gamma := K^\times/R^\times$ l'ensemble des valuations. Le groupe abélien $(\Gamma,+)$ est appelé **groupe des valuations** (ou des **valeurs**) de R.

Def. Si $\Gamma = \mathbf{Z}$, i.e. est engendré par un unique élément, on dira que R est un anneau de valuation **discrète**.

Prop. Soit R un anneau de valuation de K. On a :

(i) $v(x)=\infty \iff x=0$

(ii) $v(xy)=v(x)+v(y)$

(iii) $v(x+y) \geqslant \min\{v(x),v(y)\}$

(iv) $v(x+y)=\min\{v(x),v(y)\}$ si $v(x)=v(y)$

De plus $v(K^\times)=\Gamma$ et $R=\{x\in K \mid v(x)\geqslant 0\}$.

Ex. Soit $K=k(t)$ et h un polynôme unitaire irréductible sur k. On pose, pour $f\in k[t]$, $v_h(f)$ est l'exposant de la plus grande puissance de h qui divise f. Si $g\in k[t]\setminus\{0\}$, $v_h\left(\frac{f}{g}\right)=v_h(f)-v_h(g)$. Alors v_h vérifie les conditions ci-dessus et atteint 1 en h. De plus R est l'ensemble des fractions rationnelles sans h facteur du dénominateur.

Ex. Soit p premier et $K=\mathbf{Q}$. Pour $m\in\mathbf{Z}$, on pose $v_p(m)$ la valuation p-adique de m, i.e. l'exposant de la plus grande puissance de q qui divise m. Si $\frac{n}{m}\in\mathbf{Q}$, $v_p\left(\frac{n}{m}\right)=v_p(n)-v_p(m)$. Alors v_p vérifie les conditions ci-dessus et atteint 1 en p. De plus R est l'ensemble des rationnels dont le dénominateur réduit n'est pas multiple de p.

Rem. Si A est un anneau intègre et $v\colon A\to\mathbf{Z}\cup\{\infty\}$ vérifie *(i)*, *(ii)* et *(iii)* alors il existe une unique fonction $v\colon \mathrm{Frac}(A)\to\mathbf{Z}\cup\{\infty\}$ qui prolonge le v donné sous les mêmes conditions, à savoir $v\colon \frac{x}{y}\mapsto v(x)-v(y)$ où $y\neq 0$. Si, de plus, v est positive sur A alors $A\subset R$ ou R est l'anneau de la valuation.

Def. Un anneau R est dit **local** s'il vérifie l'une des propriétés équivalentes suivantes :

(i) R a un unique idéal maximal,

(ii) le complémentaire de $R^\times$ dans R est un idéal (forcément maximal),

(iii) pour tout $x\in R$, soit x est inversible, soit $1-cx$ est inversible pour tout $c\in R$.

Prop. Un anneau de valuation est un anneau local. Son idéal maximal est $\mathfrak{m}_v=\{x\in R\mid v(x)>0\}$.

Def. On note parfois $\mathcal{O}_v$ l'anneau de valuation associé à la valuation v. Le corps $\varkappa_v=\mathcal{O}_v/\mathfrak{m}_v$ s'appelle **corps résiduel** de la valuation v.

Prop. Si v est une valuation au-dessus de k (corps de base) alors $\varkappa_v$ est une extension de k. Son degré (s'il est fini) s'appellera degré sur k de la valuation v.

Def. Soit K un corps de fonction de courbe sur k. Une valuation non triviale au-dessus de k sur un corps K de fonctions de k s'appelle une **place** de K (ou de la courbe C telle que $K=k(C)$). On note $\mathscr{V}_{K/k}$ ou $\mathscr{V}_C$ l'ensemble de ces places.

Prop. Soit K un corps, $A\subset K$ un sous-anneau et $\mathfrak{p}$ un idéal premier de A. Alors il existe un anneau de valuation R de K tel que $A\subset R\subset K$ et $\mathfrak{m}\cap A=\mathfrak{p}$ où $\mathfrak{m}$ est l'idéal maximal de R.

Cette proposition sert à construire des valuations "centrées" sur un idéal premier $\mathfrak{p}$ qu'on s'est donné.

Prop. Soit K un corps et $A\subset K$ un sous-anneau. Alors $B:=\bigcap_{A\subset R\subset K} R$ (avec R anneau de valuation de K) est exactement l'ensemble des $x\in K$ entiers (algébriques) sur A au sens où il existe $f\in A[t]$ unitaire, non constant, à coefficients dans A tels que $f(x)=0$. B est donc un sous-anneau de K et s'appelle **fermeture intégrale** de A dans K, ou **clôture intégrale** lorsque $K=\mathrm{Frac}(A)$. En particulier, si k est un sous-corps de K alors B est la fermeture algébrique de k dans K.

Prop. Soit $\mathcal{O}_v$ un anneau de valuation discrète de valuation v. Un élément $t\in\mathcal{O}_v$ engendre $\mathfrak{m}$ en tant qu'idéal si et seulement si $v(t)=1$. Il est appelé **uniformisante** de $\mathcal{O}_v$ et pour un tel t fixé (il en existe) :

- tout $x\neq 0$ de K a une représentation unique sous la forme $x=ut^r$ avec $u\in\mathcal{O}_v^\times$ et $r\in\mathbf{Z}$, avec $r=v(x)$,
- tout idéal $I\neq\{0\}$ de $\mathcal{O}_v$ est l'idéal $\mathfrak{m}^r=\{x\in\mathcal{O}_v\mid v(x)\geqslant r\}$ engendré par t^r pour un certain $r\in\mathbf{N}$.

Places des courbes

Lem. Soit K un corps de fonctions de courbes sur k et v une valuation de K au-dessus de k. Alors :

(i) Si x vérifie $v(x)\neq 0$ et $v(x)<\infty$ alors x est transcendant sur k et le corps K est fini sur $k(x)$.

(ii) Si $x_1,\dots,x_n$ vérifient $0<v(x_1)<v(x_2)<\cdots<v(x_n)<\infty$, alors $x_1,\dots,x_n$ sont linéairement indépendants sur $k(x_n)$, et en particulier le degré $[K:k(x_n)]$ (fini) est supérieur ou égal à n.

(iii) Si x vérifie $0<v(x)<\infty$ alors $[\varkappa_v:k]\leqslant[K:k(x)]$.

Prop. Soit K un corps de fonctions de courbe sur k. Alors toutes les places de K sont discrètes.

Dans ce cas $\varkappa_v$ est une extension finie, donc algébrique, de k. Le degré $[\varkappa_v:k]$ s'appelle aussi degré de la place v. S'il vaut 1, i.e. $\varkappa_v=k$, v est dite rationnelle. C'est notamment le cas si v est algébriquemet clos.

Def. Soit K un corps de fonctions de courbe sur k. Si $f \in K$ et $v \in \mathcal{V}_K$ on peut définir l'**évaluation** de f en v

$$f(v) \in \varkappa_v, \quad f(v) = \begin{cases} \text{la classe de } f \in \mathcal{O}_v \text{ modulo } \mathfrak{m}_v \text{ lorsque } v(f) \geqslant 0 \\ \text{le symbole spécial } \infty \text{ (pas celui de } v(0)) \text{ lorsque } v(f) = 0 \end{cases}$$

Dans le cas $f(v) = \infty$ on dit que f a un **pôle** en v. On a trois possibilités exclusives :

$$\begin{array}{lll} v(f) > 0 \iff f(v) = 0 \iff f \in \mathfrak{m}_v & & f \text{ a un } \textbf{zéro} \text{ en } v \\ v(f) < 0 \iff f(v) = \infty \iff f \notin \mathcal{O}_v & & f \text{ a un } \textbf{pôle} \text{ en } v \\ v(f) = 0 \iff f(v) \in \varkappa_v^\times \iff f \in \mathcal{O}_v^\times & & \end{array}$$

$v(f)$ est appelé multiplicité du zéro de f en v, et $-v(f)$ multiplicité du pôle. Si $v(f) = 1$, f est appelé **paramètre local** pour K en v (comme uniformisante).

Prop. La fermeture algébrique $\tilde{k}$ de k dans K peut s'appeler **corps des constantes** et coïncide avec $\{f \in K \mid \forall v \in \mathcal{V}_K, v(f) = 0\}$, ces fonctions f étant dites **constantes**. On a alors l'équivalence suivante :

$$\begin{array}{lll} f \text{ n'est pas constante} \iff & f \text{ est transcendante} & \iff \exists v \in \mathcal{V}_K \text{ où } f \text{ ait un pôle} \\ \iff & f \text{ n'est pas nulle et } \exists v \in \mathcal{V}_K \text{ où } f \text{ ait un zéro} & \end{array}$$

Rem. Tous les corps résiduels $\varkappa_v$ sont des extensions de $\tilde{k}$. Notamment $[\tilde{k} : k]$ divise tous les $\deg(v) = [\varkappa_v : k]$ et, en particulier, s'il existe une place **rationnelle**, i.e. telle que $\deg(v) = 1$, ou simplement deux places de degrés premiers entre eux, on a $\tilde{k} = k$.

Les places de la droite projective

Soit $h \in k[t]$ unitaire et irréductible, $v_h(f)$ pour $f \in k[t]$ l'exposant de h dans la décomposition de f en polynômes irréductibles et $\forall f, g \in k[t], v_h\left(\frac{f}{g}\right) = v_h(f) - v_h(g)$.

Prop. Le corps résiduel $\varkappa_h$ de la place v_h est le corps de rupture $k[t]/(h)$ de h sur k.

Rem. La valeur de f en la place v_ξ, définie comme v_h où $h = t - \xi, \xi \in k^{\mathrm{alg}}$, peut s'identifier à la valeur $f(\xi)$ dans le corps $k(\xi) = k[t]/(h)$.

Rem. Une autre valuation non-triviale de $k(t)$ au-dessus de k est $v_\infty \colon \frac{f}{g} \mapsto \deg(g) - \deg(f)$.

Prop. Soit k un corps. Alors les places du corps $k(t)$ sont exactement v_∞ et les places v_h.

Rem. Lorsque k est algébriquement clos, les places de $\mathbf{P}^1_k$ s'identifient donc aux éléments de k ($x \in k$ est identifié à $f \in k(t) \mapsto v_x(f)$) plus l'élément ∞ (correspondant à la valuation v_∞).

L'indépendance des valuations

L'identité du degré

Diviseurs sur les courbes

Espaces de Riemann-Roch

Différentielles de Kähler

Def. Soit k un anneau et A une k-algèbre. On appelle espace des **différentielles de Kähler** de A sur k, noté $\Omega^1_{A/k}$, le A-module engendré par les symboles $\mathrm{d}x$ pour $x \in A$, soumis aux relations suivantes :

(i) $\mathrm{d} \colon A \to \Omega^1_{A/k}$ est linéaire, i.e. $\forall x, x' \in A, \mathrm{d}(x + x') = \mathrm{d}x + \mathrm{d}x'$ et $\forall c \in k, \forall x \in A, \mathrm{d}(cx) = c\,\mathrm{d}x$,

(ii) $\forall x, y \in A, \mathrm{d}(xy) = x\,\mathrm{d}y + y\,\mathrm{d}x$.

Donc $\Omega^1_{A/k}$ est le quotient du A-module libre de base $\{\mathrm{d}x, x \in A\}$ par le sous-module engendré par les relations ci-dessus.

Prop. Soit K une extension de corps de k de type fini. Les propriétés suivantes sont équivalentes :

- si la caractéristique est $p > 0$ alors, dans K, les corps K^p et k sont linéairement disjoints sur k^p,
- il existe une base de transcendance $(t_1, \ldots, t_n)$ pour laquelle K est (algébrique) séparable sur $k(t_1, \ldots, t_n)$.

Lorsque ces conditions sont vérifiées on dit que K est **séparable**. On dit aussi que $(t_1, \ldots, t_n)$ est une base de transcendance **séparante**.

Rem. Toute extension de corps en caractéristique 0 est séparable.

Prop. Si $K = k(C)$ est le corps des fractions d'une courbe sur un corps k et qu'au moins une des hypothèses suivantes est satisfaite :

- le corps de base k est parfait,
- la courbe C est irréductible.

alors l'extension K est séparable.

Prop. Soit K une extension de corps de k de type fini et séparable. Soit $(t_1, \ldots, t_n)$ une base de transcendance séparante. Alors $\Omega^1_{K/k}$ est un K-espace vectoriel de base $\mathrm{d}t_1, \ldots, \mathrm{d}t_n$. Réciproquement, si $t_1, \ldots, t_n \in K$ sont tels que $\mathrm{d}t_1, \ldots, \mathrm{d}t_n$ sont linéairement indépendants sur K, alors ils sont une base de transcendance séparante.

...

Théorème de Riemann-Roch
Points et places
Revêtements de courbes