# Programme de colle semaine 27 - du 26/04 au 30/04

**Présentation et conseils.** On peut voir la présentation et des conseils pour les colles dans les programmes des premières semaines, 4 e 5.

`http://thierry.limoges.free.fr/PTSI_2021/Prog_colle_semaine_04.pdf`

**Rappel.** L'interrogation peut porter sur l'ensemble des chapitres étudiés depuis le début de l'année. Ceux apparaissant ci-dessous n'en sont que le sommet de la pile.

**Exemples de questions de cours.**

- Base canonique de $\mathbb{K}^n$, de $\mathscr{M}_{n,p}(\mathbb{K})$, de $\mathbb{K}_n[\mathrm{X}]$.
- Énoncer la proposition de la division euclidienne dans $\mathbb{K}[\mathrm{X}]$ ;
  puis montrer que $\mathrm{P}(a) = 0 \iff (\mathrm{X}-a)|\mathrm{P}$.
- Énoncer la formule de Taylor pour les polynômes, puis montrer que pour $\mathrm{P} \in \mathbb{K}[\mathrm{X}]$ et $a \in \mathbb{K}$, $(\mathrm{X}-a)^2|\mathrm{P} \iff \mathrm{P}(a) = 0$ et $\mathrm{P}'(a) = 0$. Que signifient ces propriétés en terme de multiplicité de $a$ comme racine de P ?
- Soient $a \in \mathbb{K}$ et $m \in \mathbb{N}^*$. Énoncer la définition et la caractérisation de « $a$ est racine de P de multiplicité $m$ ».
- Soit $\mathrm{P} = \sum_{k=0}^{n} a_k \mathrm{X}^k$ avec $a_n \neq 0$.
  Combien P a-t-il de racines dans $\mathbb{C}$ comptées avec multiplicité ?
  Que vaut la somme des racines de P comptées avec multiplicité ?
  Que vaut le produit des racines de P comptées avec multiplicité ?

## Chapitre 19. Espaces vectoriels.

| |
|---|
| On a défini $\mathbb{K}[\mathrm{X}]$, on peut donc travailler avec cet espace vectoriel et ses sous-espaces, en plus de ceux précédemment définis. |

Ensemble du chapitre.
I) Structure de $\mathbb{K}$-espace vectoriel.
II) Sous-espaces vectoriels
III) Applications linéaires
IV) Somme de sous-espaces vectoriels, somme directe, supplémentaires
V) Familles finies.

## Chapitre 20. Rudiments d'arithmétique dans $\mathbb{N}$.

Tout le chapitre. Voir résumé de cours.

▲ Les points suivants sont hors programme en filière PTSI. La relation de Bézout, les entiers premiers entre eux, le lemme de Gauss, le vocabulaire valuation $p$-adique, les congruences, l'arithmétique dans $\mathbb{Z}$.

▲ La caractérisation de la divisibilité en termes de valuations $p$-adiques et l'expression du pgcd et du ppcm à l'aide des valuations $p$-adiques ont été énoncées, mais sont hors programme.

# Chapitre 21. Polynômes.

I) L'ensemble $\mathbb{K}[X]$

Construction possible comme les suites $(a_k)_{k\in\mathbb{N}^*}$ d'éléments de $\mathbb{K}$ s'annulant à partir d'un certain rang, ie comportant un nombre fini de termes non nuls.

Pour P non nul, on écrit $P = \sum_{k=0}^{n} a_k X^k$ avec $n = \max\{k \in \mathbb{N} \mid a_k \neq 0\}$, et $X = (0, 1, 0, 0, 0, \dots)$ ; $X^k = (0, \dots, 0, 1, 0, 0, 0, \dots)$ où le 1 est à la $k$-ième place (en numérotant à partir de zéro).

Le degré de P est $n$.

Par convention, on pose $\deg(0) = -\infty$, mais pour rédiger en parlant du degré, on traitera souvent à part le cas du polynôme nul (notamment les propositions donnant le comportement du degré vis-vis des opérations)

Le coefficient dominant est $a_n$.

Le terme de plus haut degré, ou terme dominant, est $a_n X^n$.

P est dit unitaire lorsque $a_n = 1$, ie $P = X^n + a_{n-1}X^{n-1} + \cdots + a_0$.

Opérations. Pour $P = \sum_{k=0}^{n} a_k X^k$, $Q = \sum_{k=0}^{m} b_k X^k$, $\lambda \in \mathbb{K}$,

Combinaison linéaire $\lambda P + Q = \sum_{k=0}^{\max(n,m)} (\lambda a_k + b_k)X^k$.

On a $\deg(P + Q) \leqslant \max(\deg(P), \deg(Q))$, avec égalité si et seulement si $\deg(P) \neq \deg(P)$ ou $a_n \neq -b_n$, ie tous les cas hors ceux où la somme des termes dominant s'annule, $(a_n + b_n)X^n = 0$.

Produit $PQ = R = \sum_{\ell=0}^{n+m} c_\ell X^\ell$ avec $c_\ell = \sum_{k=0}^{\ell} a_k b_{\ell-k}$.

On a $\deg(PQ) = n + m = \deg(P) + \deg(Q)$.

Composition $Q \circ P = Q(P) = \sum_{k=0}^{m} b_k P^k$ où $P^0 = 1$ et $P^k$ est le produit $P \times P \times \cdots P$, $k$ fois, défini par récurrence sur $k$.

On a $\deg(Q(P)) = nm = \deg(P) \times \deg(Q)$.

On a $Q(X) = Q$ et le produit est cohérent avec la notation $X^k$.

Évaluation d'un polynôme.

Dans $\mathbb{K}$. Pour $x \in \mathbb{K}$, $P(x) = \sum_{k=0}^{n} a_k x^k$.

Dans $\mathscr{M}_p(\mathbb{K})$. Pour $M \in \mathscr{M}_p(\mathbb{K})$, $P(M) = \sum_{k=0}^{n} a_k M^k$, où $M^0 = I_p$.

Dans $\mathscr{L}(E)$. Pour $f \in \mathscr{L}(E)$, $P(f) = \sum_{k=0}^{n} a_k f^k$, où $f^0 = \mathrm{id}_E$, $f^2 = f \circ f$, $f^3 = f \circ f \circ f$, ..., $f^{k+1} = f \circ f^k$ est défini par récurrence sur $k$.

La multiplication des polynômes est envoyée sur la composition des endomorphismes.

Pour $n \in \mathbb{N}$, $\mathbb{K}_n[X]$ est l'ensemble des polynômes de degré inférieur ou égal à $n$.

Proposition. $(\mathbb{K}[X], +, \cdot)$ est un $\mathbb{K}$-espace vectoriel. $\mathbb{K}_n[X]$ en est un sous-espace vectoriel.

Pour $\mathrm{P} \in \mathbb{K}[\mathrm{X}]$, la fonction $\widetilde{\mathrm{P}}\colon \begin{cases} \mathbb{K} \longrightarrow \mathbb{K} \\ x \longmapsto \mathrm{P}(x) = \sum_{k=0}^{n} a_k x^k \end{cases}$, encore notée P, est la fonction polynomiale associée à P. Ce n'est pas une application linéaire en général (comparer avec l'évaluation ci-dessous).

Les évaluations sont des applications linéaires, ie

Pour $x \in \mathbb{K}$ fixé, $\varphi_x\colon \begin{cases} \mathbb{K}[\mathrm{X}] \longrightarrow \mathbb{K} \\ \mathrm{P} \longmapsto \mathrm{P}(x) = \sum_{k=0}^{n} a_k x^k \end{cases}$ est une forme linéaire,

Pour $\mathrm{M} \in \mathscr{M}_p(\mathbb{K})$ fixée, $\varphi_{\mathrm{M}}\colon \begin{cases} \mathbb{K}[\mathrm{X}] \longrightarrow \mathscr{M}_p(\mathbb{K}) \\ \mathrm{P} \longmapsto \mathrm{P}(\mathrm{M}) = \sum_{k=0}^{n} a_k \mathrm{M}^k \end{cases}$ est linéaire,

Pour $f \in \mathscr{L}(\mathrm{E})$ fixé, $\varphi_f\colon \begin{cases} \mathbb{K}[\mathrm{X}] \longrightarrow \mathscr{L}(\mathrm{E}) \\ \mathrm{P} \longmapsto \mathrm{P}(f) = \sum_{k=0}^{n} a_k f^k \end{cases}$ est linéaire.

Pour $\mathrm{P} \in \mathbb{K}[\mathrm{X}]$ fixé, la composition à gauche $\mathrm{P}\colon \begin{cases} \mathbb{K}[\mathrm{X}] \longrightarrow \mathbb{K}[\mathrm{X}] \\ \mathrm{P} \longmapsto \mathrm{Q}(\mathrm{P}) = \mathrm{Q} \circ \mathrm{P} \end{cases}$ est linéaire.

▲ La semaine prochaine seulement, étude de familles $(\mathrm{P}_0, \dots, \mathrm{P}_n)$ de polynômes de degrés échelonnés.

II) Dérivation dans $\mathbb{K}[\mathrm{X}]$

Dérivation dans $\mathbb{K}[\mathrm{X}]$. Pour $\mathrm{P} = \sum_{k=0}^{n} a_k \mathrm{X}^k$, on pose $\mathrm{P}' = \sum_{k=1}^{n} a_k k \mathrm{X}^{k-1} = \sum_{k=0}^{n-1} a_{k+1}(k+1)\mathrm{X}^k$.

Pour $\mathbb{K} = \mathbb{R}$ et $\mathrm{P} \in \mathbb{K}[\mathrm{X}]$, la fonction dérivée de la fonction polynomiale associée à P est la fonction polynomiale associée au polynôme dérivé de P, ie $\left(\widetilde{\mathrm{P}}\right)' = \widetilde{(\mathrm{P}')}$,
ie la dérivée de $x \longmapsto \sum_{k=0}^{n} a_k x^k$ est $x \longmapsto \sum_{k=1}^{n} a_k k x^{k-1}$.

La dérivation est linéaire, ie $\mathrm{D}\colon \begin{cases} \mathbb{K}[\mathrm{X}] \longrightarrow \mathbb{K}[\mathrm{X}] \\ \mathrm{P} \longmapsto \mathrm{P}' \end{cases}$ est linéaire.

Pour $(\mathrm{P}, \mathrm{Q}) \in \mathbb{K}[\mathrm{X}]$, on a $(\mathrm{PQ})' = \mathrm{P}'\mathrm{Q} + \mathrm{PQ}'$, ainsi que la formule de Leibniz qui en découle.

La dérivée $k^{\mathrm{e}}$ d'un polynôme peut-être définie par récurrence. On pose $\mathrm{P}^{(0)} = \mathrm{P}$, et $\mathrm{P}^{(k+1)} = \left(\mathrm{P}^{(k)}\right)'$.

On obtient, pour $\mathrm{P} = \sum_{i=0}^{n} a_i \mathrm{X}^i$, $\mathrm{P}^{(k)} = \sum_{i=k}^{n} a_i \dfrac{i!}{(i-k)!} \mathrm{X}^{i-k}$ si $k \leqslant n$, et $\mathrm{P}^{(k)} = 0$ si $k \geqslant n+1$.

Formule de Leibniz.

Formule de Taylor. Pour $\mathrm{P} \in \mathbb{K}_n[\mathrm{X}]$ et $a \in \mathbb{K}$, on a $\mathrm{P} = \sum_{k=0}^{n} \dfrac{\mathrm{P}^{(k)}(a)}{k!}(\mathrm{X} - a)^k$.

III) Division euclidienne dans $\mathbb{K}[\mathrm{X}]$.

Définition et théorème (division euclidienne dans $\mathbb{K}[\mathrm{X}]$).

Pour tous polynômes A et B avec $\mathrm{B} \neq 0$,
il existe un unique couple $(\mathrm{Q}, \mathrm{R})$ tel que $\mathrm{A} = \mathrm{BQ} + \mathrm{R}$ et $\deg(\mathrm{R}) < \deg(\mathrm{B})$.

Méthodes pratiques pour obtenir le quotient et le reste (cas général, ou en les cherchant d'un certain degré lorsque celui-ci est petit).

Exemples de méthodes pour obtenir seulement le reste.

Pour $\mathrm{B} \neq 0$, on a $\mathrm{B}|\mathrm{A}$ si et seulement si le reste de la division euclidienne de A par B est nul.

IV) Racines (ou zéros) d'un polynôme.
Pour $\mathrm{P} \in \mathbb{K}[\mathrm{X}]$ et $a \in \mathbb{K}$, on dit que $a$ est racine de P lorsque $\mathrm{P}(a) = 0$.
Caractérisation par la divisibilité. $a$ est racine de P si et seulement si $(\mathrm{X}-a)|\mathrm{P}$.
Le nombre de racines d'un polynôme P non nul est majoré par le degré de P.
Multiplicité d'une racine. Pour $\mathrm{P} \in \mathbb{K}[\mathrm{X}]$, $a \in \mathbb{K}$ et $m \in \mathbb{N}^*$, on dit que $a$ est racine de P de multiplicité (ou d'ordre) $m$ lorsque $(\mathrm{X}-a)^m|\mathrm{P}$ et $(\mathrm{X}-a)^{m+1}$ ne divise pas P.
Vocabulaire racine simple, double, ...
Caractérisation par les dérivées successives. $a$ est racine de P de multiplicité $m$ si et seulement si $\forall k \in [\![ 0\,;\, m-1 ]\!] \quad \mathrm{P}^{(k)}(a) = 0$ et $\mathrm{P}^{(m)}(a) \neq 0$.
Conséquence. La seule condition $\forall k \in [\![ 0\,;\, m-1 ]\!] \quad \mathrm{P}^{(k)}(a) = 0$ est équivalent à $(\mathrm{X}-a)^m|\mathrm{P}$, c'est-à-dire lorsque $a$ est racine de P d'ordre supérieur ou égal à $m$.
Le nombre de racines comptées avec multiplicité d'un polynôme P non nul est majoré par le degré de P.
Définition d'un polynôme scindé sur $\mathbb{K}$, d'un polynôme scindé à racines simples.

Proposition. Un polynôme de degré $n$ qui admet $(n+1)$ racines est le polynôme nul.
Un polynôme qui admet une infinité de racines est le polynôme nul.
Identification des fonctions polynomiales.

V) Décomposition en produit d'irréductibles de $\mathbb{C}[\mathrm{X}]$ et $\mathbb{R}[\mathrm{X}]$.
Théorème de d'Alembert-Gauss (admis). Irréductibles de $\mathbb{C}[\mathrm{X}]$.
Théorème de décomposition en facteurs irréductibles dans $\mathbb{C}[\mathrm{X}]$.
Lemme 1. Pour $\mathrm{P} \in \mathbb{R}[\mathrm{X}]$ et $z \in \mathbb{C}$, $\mathrm{P}(\overline{z}) = \overline{\mathrm{P}(z)}$.
Lemme 2. Pour $\mathrm{P} \in \mathbb{R}[\mathrm{X}]$, si $a$ est une racine complexe non réelle de P de multiplicité $m$, alors $\overline{a}$ est aussi une racine de P, de même multiplicité $m$.
Description des irréductibles de $\mathbb{R}[\mathrm{X}]$.
Théorème de décomposition en facteurs irréductibles dans $\mathbb{R}[\mathrm{X}]$. On l'obtient à partir de la décomposition dans $\mathbb{C}[\mathrm{X}]$ en regroupant les facteurs correspondant à 2 racines complexes conjuguées non réelles.

VI) Somme et produit des racines d'un polynôme
Expressions de la somme et du produit des racines (d'un polynôme scindé, comptées avec multiplicité) en fonction de ses coefficients.
▲ Les autres fonctions symétriques élémentaires sont hors programme.

# Chapitre 21. Compléments sur les bases.

Base canonique de $\mathbb{K}_n[\mathrm{X}]$.
Une famille finie de polynômes non nuls de degrés échelonnés est libre.