



Anneaux de polynômes I

Exercice 1

1. Soit A un anneau quelconque. Alors l'anneau de polynômes $A[x]$ n'est pas un corps.
2. Montrer que pour un anneau intègre A , les polynômes unitaires linéaires de $A[x]$ sont irréductibles.
3. Décrire tous les polynômes irréductibles de $\mathbb{C}[x]$ et de $\mathbb{R}[x]$.
4. Démontrer que pour tout corps K , l'anneau de polynômes $K[x]$ a une infinité de polynômes unitaires irréductibles.

[Correction ▼](#)

[002261]

Exercice 2

1. Montrer que l'idéal (x, n) où $n \in \mathbb{Z}, n > 1$ de l'anneau $\mathbb{Z}[x]$ n'est pas principal.
2. Soit A un anneau intègre. Montrer que $A[x]$ est principal ssi A est un corps.

[Correction ▼](#)

[002262]

Exercice 3

Soit $f(x) \in A[x]$ un polynôme sur un anneau A . Supposons que $(x-1) \mid f(x^n)$. Montrer que $(x^n-1) \mid f(x^n)$.

[Correction ▼](#)

[002263]

Exercice 4

Pour $n, m \geq 2$, déterminer le reste de la division euclidienne du polynôme $(x-2)^m + (x-1)^n - 1$ par $(x-1)(x-2)$ dans $\mathbb{Z}[x]$.

[Correction ▼](#)

[002264]

Exercice 5

1. Si K est un corps, montrer qu'un polynôme P de degré 2 ou 3 dans $K[x]$ est irréductible si et seulement si il n'a pas de zéro dans K .
2. Trouver tous les polynômes irréductibles de degré 2, 3 à coefficients dans $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$.
3. En utilisant la partie précédente, montrer que les polynômes $5x^3 + 8x^2 + 3x + 15$ et $x^5 + 2x^3 + 3x^2 - 6x - 5$ sont irréductibles dans $\mathbb{Z}[x]$.
4. Décrire tous les polynômes irréductibles de degré 4 et 5 sur $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$.

[Correction ▼](#)

[002265]

Exercice 6

1. Trouver tous les polynômes irréductibles de degré 2, 3 à coefficients dans le corps $\mathbb{F}_3 = \mathbb{Z}/3\mathbb{Z}$.

2. Décomposer les polynômes suivants en facteurs irréductibles dans $\mathbb{F}_3[x]$.

$$x^2 + x + 1, \quad x^3 + x + 2, \quad x^4 + x^3 + x + 1.$$

[Correction ▼](#)

[002266]

Exercice 7

En utilisant les réductions mod 2 ou mod 3 montrer que les polynômes $x^5 - 6x^3 + 2x^2 - 4x + 5$, $7x^4 + 8x^3 + 11x^2 - 24x - 1$ sont irréductibles dans $\mathbb{Z}[x]$.

[Correction ▼](#)

[002267]

Exercice 8

Soient

$$f(x) = (x - a_1)(x - a_2) \dots (x - a_n) - 1, \quad g(x) = (x - a_1)^2(x - a_2)^2 \dots (x - a_n)^2 + 1$$

où $a_1, \dots, a_n \in \mathbb{Z}$ soient deux à deux distincts. Montrer que f et g sont irréductibles dans $\mathbb{Q}[x]$.

[Correction ▼](#)

[002268]

Exercice 9

Soient $f, g \in \mathbb{Q}[x]$. Supposons que f soit irréductible et qu'il existe $\alpha \in \mathbb{C}$ tel que $f(\alpha) = g(\alpha) = 0$. Alors f divise g .

[Correction ▼](#)

[002269]

Exercice 10

Pour quel n, m dans \mathbb{Z} la fraction

$$\frac{11n + 2m}{18n + 5m}$$

est réductible ?

[Correction ▼](#)

[002270]

Exercice 11

Trouver le pgcd($x^n - 1, x^m - 1$) dans $\mathbb{Z}[x]$.

[Correction ▼](#)

[002271]

Exercice 12

Trouver le pgcd(f, g) dans $\mathbb{Z}_2[x]$ et sa représentation linéaire $fu + gv$ où $d, u, v \in \mathbb{Z}_2[x]$:

1.

$$f = x^5 + x^4 + 1, \quad g = x^4 + x^2 + 1;$$

2.

$$f = x^5 + x^3 + x + 1, \quad g = x^4 + 1.$$

[Correction ▼](#)

[002272]

Exercice 13

Trouver le pgcd(f, g) dans $\mathbb{Z}_3[x]$ et $\mathbb{Z}_5[x]$ de $f = x^4 + 1, g = x^3 + x + 1$.

[Correction ▼](#)

[002273]

Exercice 14

Trouver le pgcd(f, g) dans $\mathbb{Z}[x]$ de $f = x^4 + x^3 - 3x^2 - 4x - 1$ et $g = x^3 + x^2 - x - 1$.

[Correction ▼](#)

[002274]

Exercice 15

Montrer que f est irréductible dans $\mathbb{Q}[x]$:

1. $f = x^4 - 8x^3 + 12x^2 - 6x + 2$;
2. $f = x^5 - 12x^3 + 36x - 12$;
3. $f = x^4 - x^3 + 2x + 1$;
4. $f = x^{p-1} + \dots + x + 1$, où p est premier.

[Correction ▼](#)

[002275]

Exercice 16

Soient $A = \mathbb{Z}[\sqrt{-3}]$ et K son corps de fractions. Montrer que $x^2 - x + 1$ est irréductible dans $A[x]$ sans pour autant être irréductible dans $K[x]$. Expliquer la contradiction apparente avec le corollaire du lemme de Gauss.

[Correction ▼](#)

[002276]

Exercice 17

Soit $P \in \mathbb{Z}[x]$.

1. Supposons que $P(0), P(1)$ soient impairs. Montrer que P n'a pas de racine dans \mathbb{Z} . (*Indication* : Utiliser la réduction modulo 2.)
2. Soit $n \in \mathbb{N}$ tel qu'aucun des entiers $P(0), \dots, P(n-1)$ ne soit divisible par n . Montrer que P n'a pas de racine dans \mathbb{Z} .

[Correction ▼](#)

[002277]

Exercice 18

1. Soit $P \in \mathbb{Z}[x]$. Soit $\frac{a}{b}$ sa racine rationnelle : $P(\frac{a}{b}) = 0$, $\text{pgcd}(a, b) = 1$. Montrer que $\forall k \in \mathbb{Z}$ ($a - bk$) divise $P(k)$.
2. Quelles racines rationnelles ont les polynômes $f(x) = x^3 - 6x^2 + 15x - 14$ et $g(x) = 2x^3 + 3x^2 + 6x - 4$?

[Correction ▼](#)

[002278]

Exercice 19

1. Soient $P \in \mathbb{Z}[x], n \in \mathbb{N}, m = P(n)$. Montrer que $\forall k \in \mathbb{Z}$ $m \mid P(n + km)$.
2. En déduire qu'il n'existe aucun polynôme $P \in \mathbb{Z}[x]$, non constant, tel que, pour tout $n \in \mathbb{Z}$, $P(n)$ soit un nombre premier.

[Correction ▼](#)

[002279]

Correction de l'exercice 1 ▲

1. Le polynôme X n'est jamais inversible dans $A[X]$. Si A n'est pas intègre, comme $A \subset A[X]$, $A[X]$ ne l'est pas non plus et ne peut pas être un corps. Si A est intègre et si $X = PQ$, alors $\deg(P) + \deg(Q) = 1$ donc P ou Q est une constante. Supposons par exemple que ce soit P . $P|X$ donc $P|1$ donc P est inversible, et $Q \sim X$.
2. Soit $P = X + a$ un polynôme unitaire linéaire de $A[X]$. Supposons que $P = P_1P_2$. Comme A est intègre, on a $\deg(P_1) + \deg(P_2) = 1$, donc P_1 ou P_2 est une constante. Supposons que ce soit P_1 . Alors $P_1|1$ et $P_1|a$. En particulier, P_1 est inversible, et donc $P_2 \sim P$.

3. Les polynômes irréductibles de $\mathbb{C}[X]$ sont les polynômes de degré 1 (théorème de Gauss).

Les irréductibles de $\mathbb{R}[X]$ sont les polynômes de degré 1 et les polynômes de degré 2 sans racine réelles. En effet, soit $P \in \mathbb{R}[X]$. P se factorise sur $\mathbb{C}[X]$ sous la forme $P = a \prod (X - \lambda_i)^{v_i}$ (avec $i \neq j \Rightarrow \lambda_i \neq \lambda_j$). Comme cette factorisation est unique, et que $P = \overline{P}$, on en déduit que si λ_i est racine de P avec multiplicité v_i , alors il en va de même pour $\overline{\lambda_i}$. Ainsi, on obtient une factorisation de P dans $\mathbb{R}[X]$: $P = a \prod_{\lambda_i \in \mathbb{R}} (X - \lambda_i)^{v_i} \prod (X^2 - 2\operatorname{Re}(\lambda_i)X + |\lambda_i|^2)^{v_i}$.

P est donc irréductible ssi P est de la forme $P = a(X - \lambda)$ avec $\lambda \in \mathbb{R}$ ou $P = a(X^2 - 2\operatorname{Re}(\lambda_i)X + |\lambda_i|^2)$ avec $\lambda \notin \mathbb{R}$.

4. Supposons que $K[X]$ ait un nombre fini de polynômes unitaires irréductibles P_1, \dots, P_k . Soit alors $P = \prod_{i=1}^k P_i + 1$.

Comme K est un corps, les irréductibles sont de degré au moins 1, et donc P n'est pas l'un des P_i . Comme P est unitaire, P n'est pas irréductible. En particulier, l'un au moins des P_i divise P . Supposons par exemple que ce soit P_1 : $\exists Q \in K[X], P = P_1Q$. Alors $P_1(Q - \prod_{i=2}^k P_i) = 1$. Donc P_1 est inversible, ce qui est faux.

Correction de l'exercice 2 ▲

1. Supposons (X, n) principal dans $\mathbb{Z}[X]$: $(X, n) = (P_0)$. Alors $P_0|n$ donc $P_0 \in \mathbb{Z}$, et $P_0|X$ donc $P_0 = \pm 1$. Ainsi $(P_0) = \mathbb{Z}[X]$. Or (X, n) est l'ensemble des polynômes dont le terme constant est un multiple de n : en effet, si $P \in (X, n)$, $\exists A, B \in \mathbb{Z}[X], P = AX + Bn$ donc le terme constant de P est un multiple de n . Réciproquement, si le terme constant de $P = \sum p_i X^i$ est un multiple de n , $p_0 = p'_0 n$, alors $P = X(\sum_{i \geq 1} p_i X^i) + p'_0 n \in (X, n)$. Ainsi, $1 \notin (X, n)$. Donc (X, n) n'est pas principal.

2. Si $A[X]$ est principal, soit $a \in A \setminus \{0\}$, et $I = (X, a)$. $A[X]$ étant principal, $\exists P_0 \in A[X], I = (P_0)$. Alors $P_0|a$ donc $P_0 \in A$, et $P_0|X$ donc $P_0|1$ et P_0 est inversible. On en déduit que $I = A[X]$. En particulier $1 \in I$: $\exists U, V \in A[X], XU + aV = 1$. Le terme constant de $XU + aV$ est multiple de a et vaut 1. a est donc inversible.

Si A est un corps, on dispose de la division euclidienne. Soit I un idéal de $A[X]$. Soit P_0 un élément de $I \setminus \{0\}$ de degré minimal. Soit $P \in I$. $\exists (Q, R) \in A[X]^2, P = P_0Q + R$ et $\deg(R) < \deg(P)$. Comme $R = P - P_0Q$, on a $R \in I$, et comme $\deg(R) < \deg(P_0)$, on a $R = 0$. Ainsi $P \in (P_0)$. On a donc $I \subset (P_0) \subset I$.

Correction de l'exercice 3 ▲

Notons $f(x^n) = P(x - 1)$. Alors $f(1) = 0 \cdot P(1) = 0$ et donc $(x - 1)|f$. Notons $f = Q(x - 1)$. On a alors $f(x^n) = Q(x^n)(x^n - 1)$. $(x^n - 1)$ divise bien f .

Correction de l'exercice 4 ▲

Notons (Q, R) le quotient et le reste de cette division euclidienne: $(x - 2)^m + (x - 1)^n - 1 = Q(x - 2)(x - 1) + R$ avec $\deg(R) \leq 1$. Notons $R = ax + b$. En évaluant en 1, on obtient $(-1)^m - 1 = a + b$, et en évaluant en 2, $2a + b = 0$. On en déduit $b = -2a$ et $a = 1 - (-1)^m$, soit $R = (1 - (-1)^m)(x - 2)$.

Correction de l'exercice 5 ▲

1. Soit P un polynôme de degré $d = 2$ ou 3 de $K[X]$.

Si P a une racine $a \in K$, alors $(X - a)|P$, et P n'est pas irréductible.

Réciproquement, si $P = AB$ avec $A, B \in K[X]$ et $A, B \notin K[X]^\times = K \setminus \{0\}$, alors $\deg(A) \geq 1$, $\deg(B) \geq 1$, et $\deg(A) + \deg(B) = d = 2$ ou 3 , donc l'un au moins des deux polynômes A et B est de degré 1. On peut supposer que c'est A . Notons $A = aX + b$. Alors $(X + a^{-1}b)|P$, et $-a^{-1}b$ est racine de P .

Finalement P a une racine ssi P n'est pas irréductible.

2. Irréductibles de degré 2 de $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$: Soit $P = aX^2 + bX + c$ un polynôme de degré 2. $a \neq 0$ donc $a = 1$.

P irréductible $\Leftrightarrow P$ n'a pas de racine

$$\begin{aligned} &\Leftrightarrow \begin{cases} P(0) &\neq 0 \\ P(1) &\neq 0 \end{cases} \\ &\Leftrightarrow \begin{cases} P(0) &= 1 \\ P(1) &= 1 \end{cases} \\ &\Leftrightarrow \begin{cases} c &= 1 \\ 1 + b + c &= 1 \end{cases} \\ &\Leftrightarrow P = X^2 + X + 1 \end{aligned}$$

Ainsi, il y a un seul irréductible de degré 2, c'est $I_2 = X^2 + X + 1$.

Irréductibles de degré 3 de $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$: Soit $P = aX^3 + bX^2 + cX + d$ un polynôme de degré 2. $a \neq 0$ donc $a = 1$.

P irréductible $\Leftrightarrow P$ n'a pas de racine

$$\begin{aligned} &\Leftrightarrow \begin{cases} d &= 1 \\ 1 + b + c + d &= 1 \end{cases} \\ &\Leftrightarrow \begin{cases} d &= 1 \\ (b, c) &= (1, 0) \text{ ou } (b, c) = (0, 1) \end{cases} \\ &\Leftrightarrow P = X^3 + X + 1 \text{ ou } P = X^3 + X^2 + 1 \end{aligned}$$

Ainsi, il y a deux irréductibles de degré 3 dans $\mathbb{Z}/3\mathbb{Z}[X]$: $I_3 = X^3 + X + 1$ et $I'_3 = X^3 + X^2 + 1$.

3. Soit $P = 5X^3 + 8X^2 + 3X + 15 \in \mathbb{Z}[X]$. Soient A et B deux polynômes tels que $P = AB$. L'application $\mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}/2\mathbb{Z}, n \mapsto \bar{n}$ induit une application $\mathbb{Z}[X] \rightarrow \mathbb{Z}/2\mathbb{Z}[X], P = \sum a_i X^i \mapsto \bar{P} = \sum \bar{a}_i X^i$. Cette application est compatible avec les opérations: en particulier $\overline{AB} = \bar{A}\bar{B}$ (pourquoi?). Ainsi on a: $\bar{P} = \bar{A}\bar{B}$. Or $\bar{P} = X^3 + X + 1$ est irréductible, donc (quitte à échanger les rôles de A et B on peut supposer que) $\bar{A} = 1$ et $\bar{B} = X^3 + X + 1$. On en déduit que B est au moins de degré 3, d'où $\deg(A) = 0$. $A \in \mathbb{Z}$ et $A|P$, donc $A|5$, $A|8$, $A|3$, et $A|15$. On en déduit que $A = \pm 1$. Finalement, $A = \pm 1$ et $B \sim P$. P est donc irréductible dans $\mathbb{Z}[X]$.

Soit $P = X^5 + 2X^3 + 3X^2 - 6x - 5 \in \mathbb{Z}[X]$. Soient A et B deux polynômes tels que $P = AB$. On a comme précédemment: $\bar{P} = \bar{A}\bar{B}$ où $\bar{P} = X^5 + X^2 + 1$. \bar{P} n'a pas de racine dans $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$, donc si \bar{P} est réductible, il doit être le produit d'un irréductible de degré 2 et d'un irréductible de degré 3. Or $\bar{P} \neq I_2 I_3$ et $\bar{P} \neq I'_2 I'_3$ (faire le calcul!), donc \bar{P} est irréductible. Le même raisonnement montre alors que P est irréductible dans $\mathbb{Z}[X]$.

4. Un polynôme de degré 4 est réductible ssi il a une racine ou est le produit de deux irréductibles de degré

2. Soit $P = \sum_{i=0}^4 a_i X^i \in \mathbb{Z}/2\mathbb{Z}[X]$, avec $a_4 = 1$.

$$\begin{aligned}
 P \text{ irréductible} &\Leftrightarrow \begin{cases} P(0) \neq 0 \\ P(1) \neq 0 \\ P \neq I_2^2 \end{cases} \\
 &\Leftrightarrow \begin{cases} a_0 = 1 \\ 1 + a_3 + a_2 + a_1 + 1 = 1 \\ P \neq I_2^2 \end{cases} \\
 &\Leftrightarrow P \in \{X^4 + X^3 + 1, X^4 + X + 1, X^4 + X^3 + X^2 + X + 1\}
 \end{aligned}$$

Un polynôme de degré 5 est irréductible ssi il n'a pas de racine et l'est pas le produit d'un irréductible de degré 2 et d'un irréductible de degré 3. Tous calculs fait, on obtient la liste suivante: $\{X^5 + X^2 + 1, X^5 + X^3 + 1, X^5 + X^4 + X^3 + X^2 + 1, X^5 + X^4 + X^3 + X + 1, X^5 + X^4 + X^2 + X + 1, X^5 + X^3 + X^2 + X + 1, \}$.

Correction de l'exercice 6 ▲

1. On raisonne exactement comme pour l'exercice 5. On peut réduire un peu les discussions en remarquant que puisqu'on est sur un corps, on peut se contenter de chercher les irréductibles *unitaires*: on obtient les autres en multipliant les irréductibles unitaires par les inversibles, soit ± 1 .

Les irréductibles de degré 2 sont caractérisés par $P(0) \neq 0$, $P(1) \neq 0$ et $P(-1) \neq 0$. On obtient finalement la liste suivante: $\{X^2 + 1, X^2 - X - 1, -X^2 - 1, -X^2 + X + 1\}$.

Sans commentaire, on obtient la liste suivante pour les irréductibles de degré 3 de $\mathbb{Z}/3\mathbb{Z}[X]$: $\{\pm(X^3 + X^2 - X + 1), \pm(X^3 - X^2 + X + 1), \pm(X^3 - X^2 + 1), \pm(X^3 - X + 1), \pm(X^3 + X^2 + X - 1), \pm(X^3 - X^2 - X - 1) \pm (X^3 + X^2 - 1), \pm(X^3 - X - 1), \}$.

$$\begin{aligned}
 2. \quad X^2 + X + 1 &= (X - 1)^2 \\
 X^3 + X + 2 &= (X + 1)(X^2 - X + 2) \\
 X^4 + X^3 + X + 1 &= (X + 1)(X^3 + 1) = (X + 1)^4
 \end{aligned}$$

Correction de l'exercice 7 ▲

On raisonne comme pour l'exercice 5. Soit $P = X^5 - 6X^3 + 2X^2 - 4X + 5$, A, B deux polynômes tels que $P = AB$. En considérant la réduction modulo 2, on a $\bar{P} = X^5 + 1$ donc la décomposition en facteurs irréductibles est $\bar{P} = (X + 1)(X^4 + X^3 + X^2 + X + 1)$. Comme P est unitaire, A et B le sont aussi, et la réduction modulo 2 préserve donc le degré de A et B . On en déduit que si $\bar{A} = X + 1$, alors A est de degré 1.

La réduction modulo 3 de P devrait donc avoir une racine. Mais $P \pmod{3} = X^5 - X^2 - X - 1$ n'a pas de racine dans $\mathbb{Z}/3\mathbb{Z}$. On en déduit que dans la réduction modulo 2, la factorisation $\bar{P} = \bar{A}\bar{B}$ est triviale ($\bar{A} = 1$ et $\bar{B} = \bar{P}$ ou le contraire), puis que la factorisation $P = AB$ elle même est triviale ($A = \pm 1$ et $B = \mp P$ ou le contraire). Ainsi, P est irréductible dans $\mathbb{Z}[X]$.

Pour $P = 7X^4 + 8X^3 + 11X^2 - 24X - 455$, on procède de la même façon. Si $P = AB$, comme 7 est premier, l'un des polynômes A ou B a pour coefficient dominant ± 7 et l'autre ∓ 1 . On en déduit que les réductions modulo 2 ou 3 préservent le degré de A et de B . Les décompositions en facteurs irréductibles sont les suivantes: $P \pmod{2} = (X^2 + X + 1)^2$ et $P \pmod{3} = (X - 1)(X^3 - X - 1)$. Si la factorisation $P = AB$ est non triviale, alors les réductions modulo 2 de A et B sont de degré 2, et donc $\deg(A) = \deg(B) = 2$. Mais la décomposition modulo 3 impose que ces degrés soient 1 et 3. La factorisation $P = AB$ est donc nécessairement triviale, et P est donc irréductible.

Correction de l'exercice 8 ▲

Commençons par montrer que ces polynômes sont irréductibles sur \mathbb{Z} .

-Le cas de $f = \prod_{i=1}^n (X - a_i) - 1$ Soit $P, Q \in \mathbb{Z}[X]$ tels que $f = PQ$. On peut supposer sans perte de généralité que P et Q ont des coefficients dominants positifs (i.e. sont unitaires).

On a : $\forall i, f(a_i) = P(a_i)Q(a_i) = -1$ donc

$$P(a_i) = \pm 1 \quad \text{et} \quad Q(a_i) = \mp 1$$

Soit $I = \{i, P(a_i) = -1\}$ et $J = \{1, \dots, n\} \setminus I$. On notera $|I|$ et $|J|$ le nombre d'éléments de I et J .

Supposons $I \neq \emptyset$ et $J \neq \emptyset$: Alors $\prod_{i \in I} (X - a_i) | (P + 1)$ et $\prod_{i \in J} (X - a_i) | (Q + 1)$. Ainsi $\deg(P + 1) \geq |I|$ et $\deg(Q + 1) \geq |J| = n - |I|$, et comme $\deg(P) + \deg(Q) = n$, on en déduit que $\deg(P) = |I|$ et $\deg(Q) = |J|$, puis que (puisque P et Q sont unitaires) :

$$P = \prod_{i \in I} (X - a_i) - 1 \quad \text{et} \quad Q = \prod_{i \in J} (X - a_i) - 1.$$

Ainsi $f = \prod_{k \in I \cup J} (X - a_k) - 1 = (\prod_{i \in I} (X - a_i) - 1)(\prod_{j \in J} (X - a_j) - 1) = f - (\prod_{i \in I} (X - a_i) + \prod_{j \in J} (X - a_j) - 2)$, donc $\prod_{i \in I} (X - a_i) + \prod_{j \in J} (X - a_j) - 2 = 0_{\mathbb{Z}[X]}$, ce qui est faux.

Ainsi $I = \emptyset$ ou $J = \emptyset$. On peut supposer sans perte de généralité que $I = \emptyset$. Alors $\forall i \in \{1, \dots, n\}, Q(a_i) = -1$. Donc les a_i sont tous racine de $Q + 1$. Comme $\deg(Q + 1) \leq n$ et $Q + 1 \neq 0$, on en déduit que $Q = f$, et $P = 1$. f est donc bien irréductible dans $\mathbb{Z}[X]$.

-Le cas de $g = \prod_{i=1}^n (X - a_i)^2 + 1$. Supposons que $g = PQ$, avec $P, Q \in \mathbb{Z}[X]$. On a $g(a_i) = 1 = P(a_i)Q(a_i)$, donc $P(a_i) = Q(a_i) = \pm 1$.

Comme g n'a pas de racine réelle, il en va de même de P et Q , qui sont donc de signe constant (théorème des valeurs intermédiaires pour les fonctions continues sur \mathbb{R} !). On peut donc supposer sans perte de généralité que P et Q sont positifs.

Alors $P(a_i) = Q(a_i) = 1$. Ainsi, tous les a_i sont racines de $P - 1$ et de $Q - 1$. On a donc $\prod_{i=1}^n (X - a_i) | P - 1$ et $\prod_{i=1}^n (X - a_i) | Q - 1$.

En particulier, si $P - 1 \neq 0$ et $Q - 1 \neq 0$, $\deg(P) \geq n$ et $\deg(Q) = 2n - \deg(P) \geq n$. Ainsi $\deg(P) = \deg(Q) = n$. Comme en plus P et Q sont unitaires, on en déduit que

$$P - 1 = \prod_{i=1}^n (X - a_i) \quad \text{et} \quad Q - 1 = \prod_{i=1}^n (X - a_i).$$

On devrait donc avoir $(\prod_{i=1}^n (X - a_i) + 1)^2 = \prod_{i=1}^n (X - a_i)^2 + 1$, ce qui est faux ($\prod_{i=1}^n (X - a_i) \neq 0_{\mathbb{Z}[X]}$) ! Ainsi $P - 1 = 0$ ou $Q - 1 = 0$, et on en déduit bien que g est irréductible dans $\mathbb{Z}[X]$.

Irréductibilité dans $\mathbb{Q}[X]$ On a le lemme suivant :

Si $P \in \mathbb{Z}[X]$ est unitaire et irréductible dans $\mathbb{Z}[X]$, alors il l'est aussi dans $\mathbb{Q}[X]$.

L'ingrédient de base de la démonstration est la notion de *contenu* d'un polynôme $P \in \mathbb{Z}[X]$: c'est le pgcd de ses coefficients, souvent noté $c(P)$. Il satisfait la relation suivante :

$$c(PQ) = c(P)c(Q).$$

Supposons que $P = QR$, avec $Q, R \in \mathbb{Q}[X]$, Q et R unitaires. En réduisant tous leurs coefficients de au même dénominateur, on peut mettre Q et R sous la forme :

$$Q = \frac{1}{a} Q_1 \quad \text{et} \quad R = \frac{1}{b} R_1$$

avec $a, b \in \mathbb{Z}$, $Q_1, R_1 \in \mathbb{Z}[X]$ et $c(Q_1) = 1$, $c(R_1) = 1$.

Alors $abP = Q_1 R_1$, donc $c(abP) = c(Q_1)c(R_1) = 1$. Comme $ab | c(abP)$, on a $ab = \pm 1$, et en fait $P, Q \in \mathbb{Z}[X]$.

Correction de l'exercice 9 ▲

f est irréductible, donc si f , ne divise pas g , alors f et g sont premiers entre eux. Ainsi, $\exists u, v \in \mathbb{Q}[X], uf + vg = 1$. En évaluant en α , on obtient $u(\alpha) \cdot 0 + v(\alpha) \cdot 0 = 1$ ce qui est impossible!

Correction de l'exercice 10 ▲

Supposons que la fraction soit réductible. Alors, il existe $p, q, d \in \mathbb{Z}$ tels que

$$\begin{cases} 11n + 2m &= pd \\ 18n + 5m &= qd \end{cases}$$

On en déduit que

$$\begin{cases} 19n &= 5pd - 2qd \\ 19m &= -18pd + 1qd \end{cases}$$

En particulier, $d|19n$ et $d|19m$. Si $d \neq 19$, on a $\text{pgcd}(n, m) \neq 1$. Si $d = 19$, alors

$$\begin{cases} n &= 5p - 2q \\ m &= -18p + 1q \end{cases} \quad (1)$$

Réciproquement, si $\text{pgcd}(n, m) \neq 1$ ou si n, m sont de la forme donnée par (1), alors la fraction est réductible.

Correction de l'exercice 11 ▲

Soit $d = \text{pgcd}(m, n)$. Notons $n = dn'$ et $m = dm'$. Alors $X^n - 1 = (X^d)^{n'} - 1$. Or $(Y - 1)|Y^{n'} - 1$ donc $(X^d - 1)|(X^n - 1)$. De même, $(X^d - 1)|(X^m - 1)$, et donc $(X^d - 1)|\text{pgcd}(X^n - 1, X^m - 1)$.

Par ailleurs, soit $D = \text{pgcd}(X^n - 1, X^m - 1)$. Les racines de D dans \mathbb{C} sont des racines à la fois n -ième et m -ième de 1, qui sont tous simples : elles sont donc de la forme $\omega = e^{i2\pi\alpha}$ où $\alpha = \frac{k}{n} = \frac{k'}{m}$. Ainsi $km' = k'n'$. On a $\text{pgcd}(m', n') = 1$, donc par le théorème de Gauss, on en déduit que k' est un multiple de m' , soit $\frac{k'}{m'} = \frac{k''}{d}$, et ω est donc une racine d -ième de 1. On en déduit que $D|X^d - 1$, et finalement :

$$\text{pgcd}(X^n - 1, X^m - 1) = X^{\text{pgcd}(m, n)} - 1.$$

Correction de l'exercice 12 ▲

Utiliser l'algorithme d'Euclide. (on travaille dans $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$).

$$\begin{aligned} x^5 + x^4 + 1 &= (x^4 + x^2 + 1)(x + 1) + x^3 + x^2 + x \\ x^4 + x^2 + 1 &= (x^3 + x^2 + x)(x + 1) + x^2 + x + 1 \\ x^3 + x^2 + x &= (x^2 + x + 1)x + 0 \end{aligned}$$

Donc $\text{pgcd}(x^5 + x^4 + 1, x^4 + x^2 + 1) = x^2 + x + 1$, et

$$\begin{aligned} x^2 + x + 1 &= (x^4 + x^2 + 1) + (x^3 + x^2 + x)(x + 1) \\ &= (x^4 + x^2 + 1) + ((x^5 + x^4 + 1) + (x^4 + x^2 + 1)(x + 1))(x + 1) \\ &= (x^4 + x^2 + 1)(1 + (x + 1)^2) + (x^5 + x^4 + 1)(x + 1) \\ &= (x^4 + x^2 + 1)(x^2) + (x^5 + x^4 + 1)(x + 1) \end{aligned}$$

De même, $\text{pgcd}(x^5 + x^3 + x + 1, x^4 + 1) = x^3 + 1$ et $x^3 + 1 = (x^5 + x^3 + x + 1) + (x^4 + 1)x$.

Correction de l'exercice 13 ▲

Dans $\mathbb{Z}/3\mathbb{Z}$: $\text{pgcd}(x^4 + 1, x^3 + x + 1) = x^2 + x - 1$.

Dans $\mathbb{Z}/5\mathbb{Z}$: $\text{pgcd}(x^4 + 1, x^3 + x + 1) = 1$.

Correction de l'exercice 14 ▲

Sur $\mathbb{Z}[X]$, $\text{pgcd}(x^4 + x^3 - 3x^2 - 4x - 1, x^3 + x^2 - x - 1) = 1$.

Correction de l'exercice 15 ▲

1. P est primitif, 2 divise tous les coefficients de P sauf le dominant, et 4 ne divise pas le terme constant : d'après le critère d'Eisenstein, on en déduit que P est irréductible dans $\mathbb{Z}[x]$ (puis dans $\mathbb{Q}[x]$ car il est unitaire...).
 2. On peut appliquer le même critère, avec 3 cette fois.
 3. f est primitif, et sa réduction modulo 2 est irréductible. Donc f est irréductible dans $\mathbb{Z}[x]$.
 4. $f(x+1) = \sum_{k=1}^p C_p^k x^{k-1}$. Or $p \mid \frac{p!}{k!(p-k)!}$ (car p apparaît au numérateur, tandis que tous les facteurs du dénominateur sont $< p$; comme p est premier, ils sont donc premiers avec p). De plus $C_p^1 = p$, donc p^2 ne divise pas le terme constant de $f(x+1)$. D'après le critère d'Eisenstein, $f(x+1)$ est irréductible, et donc f aussi.
-

Correction de l'exercice 16 ▲

Soit $P = x^2 - x + 1$. Si P a une factorisation non triviale, P est divisible par un polynôme de degré 1, et comme P est unitaire, ce diviseur peut être choisi unitaire : on en déduit que P a une racine. On calcule $P(a + bi\sqrt{3}) = (a^2 - 3b^2 - a + 1) + (2ab - b)i\sqrt{3}$. Comme $1/2 \notin A = \mathbb{Z}[i\sqrt{3}]$, $2a - 1 \neq 0$, donc si $P(a + bi\sqrt{3}) = 0$, alors $b = 0$, et $P(a) = 0$. Mais $x^2 - x + 1$ est primitif et sa réduction modulo 2 est irréductible, donc il est irréductible sur $\mathbb{Z}[x]$. En particulier il n'a pas de racine dans \mathbb{Z} . On en déduit que P n'a pas de racine sur A , et est donc irréductible.

Soit $K = \text{frac}(A) = \mathbb{Q}[i\sqrt{3}]$. On a $P(\frac{1+i\sqrt{3}}{2}) = 0$ donc P a une racine dans K , donc P est réductible sur K .

Correction de l'exercice 17 ▲

Si P a une racine α dans \mathbb{Z} , alors $P(\alpha) = 0$, et en considérant la réduction modulo n , $\bar{P}(\bar{\alpha}) = 0$, donc \bar{P} a une racine dans $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ pour tout n .

1. Si $P(0)$ et $P(1)$ sont impairs, $\bar{P}(\bar{0}) = \bar{1}$ et $\bar{P}(\bar{1}) = \bar{1}$, donc \bar{P} n'a pas de racine sur $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$. Donc P n'a pas de racine sur \mathbb{Z} .
 2. Si n ne divise aucun des $P(0), \dots, P(n-1)$, alors $\bar{P}(\bar{0}) \neq 0, \dots, \bar{P}(\overline{n-1}) \neq 0$, donc \bar{P} n'a pas de racine sur $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$. Donc P n'a pas de racine sur \mathbb{Z} .
-

Correction de l'exercice 18 ▲

1. $(X - \frac{a}{b}) \mid P$ donc $\exists Q \in \mathbb{Q}[x], P = (x - \frac{a}{b})Q = (bx - a)\frac{Q}{b}$. En réduisant tous les coefficients de Q au même dénominateur, on peut mettre Q sous la forme : $Q = \frac{1}{m}Q_1$, avec $Q_1 \in \mathbb{Z}[X]$ primitif. Alors $bdP = (bx - a)Q_1$. En considérant les contenus de ces polynômes, on a $c(bx - a) = \text{pgcd}(a, b) = 1$, $c(Q_1) = 1$ donc $c(bdP) = bdc(P) = 1$. Ainsi $bd = \pm 1$, et $(bx - a) \mid P$.
2. On considère par exemple les cas $k = 0, \dots, 3$. (Pour $k = 2$, on constate que $P(2) = 0$: on peut diviser P par $(X - 2)$ et déterminer les trois racines complexes de P ...). On obtient que

$$\begin{array}{lll} (*) & a \mid 14 & (k = 0), \\ (**) & (a - b) \mid 4 & (k = 1), \\ (***) & (a - 3b) \mid 2^3 5 & (k = 3). \end{array}$$

Au passage On peut remarquer que si $\alpha \leq 0$, $P(\alpha) < 0$, donc on peut supposer $a > 0$ et $b > 0$.

- Si $a = 1$: $(**) \Rightarrow b \in \{2, 3, 5\}$. Aucune de ces possibilités n'est compatible avec $(***)$.
- Si $a = 2$: $(**) \Rightarrow b \in \{1, 3, 4, 6\}$. Comme $\text{pgcd}(a, b) = 1$, 4 et 6 sont exclus. 3 n'est pas compatible avec $(***)$. Pour 2, on vérifie que $P(2) = 0$.
- Si $a = 7$: $(**) \Rightarrow b \in \{3, 5, 9, 11\}$. Mais aucune de ces solutions ne convient.
- Si $a = 14$: $(**) \Rightarrow b \in \{10, 12, 16, 18\}$ mais $\text{pgcd}(a, b) = 1$ exclu toutes ces possibilités.

Finalement, 2 est la seule racine rationnelle de P .

Correction de l'exercice 19 ▲

1. Notons $P = \sum_{i=0}^d a_i X^i$. Dans le calcul de $P(n + km)$, en développant tous les termes $(n + km)^i$ à l'aide du binôme, on obtient que $P(n + km) = \sum_{0 \leq j \leq i \leq d} a_i C_i^j n^j (km)^{i-j} = P(n) + mN$ où $N = \sum_{0 \leq j < i \leq d} a_i C_i^j n^j (km)^{i-j} - 1 \in \mathbb{Z}$. Donc $m | P(n + km)$.
 2. Supposons qu'un tel polynôme existe : soit $m = P(0)$. $\forall k \in \mathbb{Z}, m | P(km)$. Comme $P(km)$ est premier, on en déduit que $P(km) = \pm m$. Ceci est en contradiction avec $\lim_{k \rightarrow +\infty} P(km) = \pm \infty$.
-