

Résumé de CM9

Congruence

Définition Soit $n \in \mathbb{N}$ tel que $n > 1$. Les deux entiers a et b sont dits **congrus modulo n** lorsque n divise $a - b$. On notera $a \equiv b[n]$ ou $a \equiv b \pmod{n}$. \square

Par définition, cette relation \Leftrightarrow vérifie

1. (réflexivité) $a \equiv a[n]$,
2. (symétrie) $a \equiv b[n] \iff b \equiv a[n]$,
3. (transitivité) $a \equiv b[n] \wedge b \equiv c[n] \implies a \equiv c[n]$.

On dit que cette relation \Leftrightarrow est une **relation d'équivalence**.

Exemples Soit $m \in \mathbb{Z}$.

1. mod 2: $m \equiv 0[2] \Leftrightarrow m$: **pair** et $m \equiv 1[2] \Leftrightarrow m$: **impair**.
Donc, mod 2 nous donne la **parité**.
2. mod 10: $m \pmod{10}$ ne regarde que le dernier chiffre de m .
3. mod n : $m \pmod{n}$ ne regarde que le reste de la division euclidienne par n .

Compatibilité de cette relation \Leftrightarrow avec la somme + et le produit \times : soit $n \in \mathbb{N}$ tel que $n > 1$.

Pour $a, b, c, d \in \mathbb{Z}$ tels que $a \equiv b[n]$ et $c \equiv d[n]$,

1. $a + c \equiv b + d[n]$,
2. $a \cdot c \equiv b \cdot d[n]$.

Quelques équations

1. Soient $a, m \in \mathbb{N}^*$ tels que i) $\text{pgcd}(a, m) = 1$ et ii) $m > 1$. Soit $b \in \mathbb{Z}$.

Résoudre (E) : $ax \equiv b[m]$ pour $x \in \mathbb{Z}$.

Le théorème de Bézout implique $\exists (u, v) \in \mathbb{Z}^2$ tel que $au + mv = 1$.
Alors, $au = 1 - mv \equiv 1[m]$. Multipliant u sur (E) : $x \equiv aux[m] \equiv bu[m]$,
i.e., $x \equiv bu[m]$.

2. Soient $a_i, m_i \in \mathbb{N}^*$ ($i = 1, 2$) tels que i) $\text{pgcd}(m_1, m_2) = 1$ et ii) $m_i > 1$ ($i = 1, 2$).

Résoudre (E) : $x \equiv a_i [m_i]$ ($i = 1, 2$) pour $x \in \mathbb{Z}$.

Le théorème de Bézout implique $\exists (u_1, u_2) \in \mathbb{Z}^2$ tel que $m_1u_1 + m_2u_2 = 1$.

Posons $s_0 = a_1m_2u_2 + a_2m_1u_1$. Alors,

$$s_0 \equiv a_1m_2u_2[m_1] \equiv a_1(1 - m_1u_1)[m_1] \equiv a_1[m_1],$$

$$s_0 \equiv a_2m_1u_1[m_2] \equiv a_2(1 - m_2u_2)[m_2] \equiv a_2[m_2],$$

d'où $x = s_0$ est une solution particulière de (E) .

En particulier, $y := x - s_0$ vérifie (E') : $y \equiv 0 [m_i]$ ($i = 1, 2$),

i.e., y est un multiple commun de m_1 et m_2 , donc un multiple de $\text{ppcm}(m_1, m_2)$.

$\text{pgcd}(m_1, m_2) = 1$ implique que $\text{ppcm}(m_1, m_2) = m_1m_2$, d'où $y \in m_1m_2\mathbb{Z}$.

Donc, l'ensemble des solutions de (E) est $s_0 + m_1m_2\mathbb{Z}$.

Par la division euclidienne, $\exists !(n, k_0) \in \mathbb{Z}^2$ tel que i) $s_0 = m_1m_2n + k_0$ et ii) $0 \leq k_0 < m_1m_2$.

Alors, $s_0 + m_1m_2\mathbb{Z} = k_0 + m_1m_2(n + \mathbb{Z}) = k_0 + m_1m_2\mathbb{Z}$.

En résumé, on obtient le théorème suivant :

Théorème (Reste chinois) Soient m_1 et m_2 deux entiers naturels > 1 qui sont premiers entre eux. Soient $a_1, a_2 \in \mathbb{Z}$. Notons l'ensemble des solutions de l'équation

$$x \equiv a_i[m_i] \quad (i = 1, 2)$$

par \mathcal{S} . Alors, $\exists !k_0 \in \mathbb{N}$ tel que

$$1. \quad \mathcal{S} = k_0 + m_1m_2\mathbb{Z},$$

$$2. \quad 0 \leq k_0 < m_1m_2.$$

□

Annexe : Relation binaire sur un ensemble

Sur un ensemble E , on considère une proposition qui lie entre eux certains éléments de cet ensemble. Une **relation binaire** \mathcal{R} sur l'ensemble E est définie par une partie \mathcal{G} de $E \times E$; si $(x, y) \in \mathcal{G}$ on dit que x **est en relation avec** y ou tout simplement x **et** y **sont liés**, noté $x\mathcal{R}y$.

Exemples

1. Soit $E = \mathbb{Z}^*$ ou \mathbb{N}^* . Posons $\mathcal{G} = \{(k, l) \mid k|l\}$.
Alors, $k\mathcal{R}l \iff k|l$.
2. Soit $E = \mathbb{Z}$ et soit $n \in \mathbb{N}^*$ tel que $n > 1$. Posons $\mathcal{G} = \{(k, l) \mid n|k - l\}$.
Alors, $k\mathcal{R}l \iff k \equiv l[n]$. (**relation de congruence modulo** n)
3. Soit $E = \mathbb{R}$ ou \mathbb{Q} . Posons $\mathcal{G} = \{(x, y) \mid y - x \geq 0\}$.
Alors, $x\mathcal{R}y \iff x \leq y$.
4. Soit $E = \mathcal{P}(F)$, l'ensemble des parties d'un ensemble F . Posons $\mathcal{G} = \{(A, B) \in E \times E \mid \forall x \in A \Rightarrow x \in B\}$. Alors, $A\mathcal{R}B \iff A \subset B$. (**relation d'inclusion**)
5. Soient E et F deux ensembles et soit $f : E \rightarrow F$ une application.
Posons $\mathcal{G} = \{(x, y) \in E \times E \mid f(x) = f(y)\}$. Alors, $x\mathcal{R}y \iff f(x) = f(y)$.

Ces exemples vérifient quelques propriétés caractéristiques:

1. (réflexivité) $\forall x \in E, x\mathcal{R}x$,
2. (transitivité) $\forall x, y, z \in E, (x\mathcal{R}y \text{ et } y\mathcal{R}z) \implies x\mathcal{R}z$,
3. (symétrie) $\forall x, y \in E, x\mathcal{R}y \implies y\mathcal{R}x$,
4. (antisymétrie) $\forall x, y \in E, (x\mathcal{R}y \text{ et } y\mathcal{R}x) \iff x = y$.

Relations d'ordre

Définition Une relation binaire \mathcal{R} sur un ensemble E est appelée **relation d'ordre** sur E si elle est **réflexive**, **transitive** et **antiymétrique**. □

On note une relation d'ordre souvent par \leqslant ou \leq . Un ensemble E muni d'une relation d'ordre \leq est dit **ordonné**, noté (E, \leq) . Parmi les exemples ci-dessus, 1., 3. et 4. sont des relations d'ordre.

Définition Soit (E, \leq) un ensemble ordonné et soit A une partie de E .

1. Un élément M de E est un **majorant** de A si $\forall x \in A, x \leq M$.
2. Un élément m de E est un **minorant** de A si $\forall x \in A, m \leq x$. □

Une partie admettant un majorant (resp. minorant) est dite **majorée** (resp. **minorée**).

Un élément d'une partie A de E est appelé le **plus grand élément** (ou le **maximum**) s'il majore toutes les éléments de A . De même, un élément de d'une partie A de E est appelé le **plus petit élément** (ou le **minimum**) s'il minore tous les éléments de A .

Définition Soit (E, \leq) un ensemble ordonné et soit A une partie de E .

1. Si l'ensemble des majorants de A admet un minimum, cet élément est appelé **borne supérieure** et est noté par $\sup A$.
2. Si l'ensemble des minorants de A admet un maximum, cet élément est appelé **borne inférieure** et est noté par $\inf A$. □

N.B. Soit $E = \mathbb{R}$ et soient $a < b$ deux nombres réels.

1. Pour un intervalle $I =] -\infty, b]$ (resp. $I =] -\infty, b[$), $\sup I = b \in I$ (resp. $\sup I = b \notin I$).
2. Pour un intervalle $I =]a, +\infty[$ (resp. $I = [a, +\infty[$), $\inf I = a \notin I$ (resp. $\inf I = a \in I$). □

Relations d'équivalence

Définition Une relation binaire \mathcal{R} sur un ensemble E est appelée **relation d'équivalence** sur E si elle est **réflexive**, **transitive** et **symétrique**. □

Parmi les exemples ci-dessus, 2. et 5. sont des relations d'équivalence.

Définition La **classe d'équivalence** de $x \in E$, notée $\text{Cl}_{\mathcal{R}}(x)$, est une partie de E formée par les éléments qui sont en relation avec x :

$$\text{Cl}_{\mathcal{R}}(x) = \{ y \in E \mid x \mathcal{R} y \}.$$

Un élément quelconque de $\text{Cl}_{\mathcal{R}}(x)$ est appelé **représentant** de la classe. □

Par définition, on a les propriétés suivantes:

Proposition Soit E un ensemble et soit \mathcal{R} une relation d'équivalence sur E .

1. $\forall x \in E, x \in \text{Cl}_{\mathcal{R}}(x)$.
2. Soit $y \in E$.
 - i) Si $y \in \text{Cl}_{\mathcal{R}}(x)$, alors $\text{Cl}_{\mathcal{R}}(y) = \text{Cl}_{\mathcal{R}}(x)$, et
 - ii) si $y \notin \text{Cl}_{\mathcal{R}}(x)$, alors $\text{Cl}_{\mathcal{R}}(x) \cap \text{Cl}_{\mathcal{R}}(y) = \emptyset$. □

Ceci dit, l'ensembles des classes d'équivalence de E forme une **partition** de E .

Définition L'**ensemble quotient** d'un ensemble E par la relation d'équivalence \mathcal{R} , noté E/\mathcal{R} , est l'ensemble des classes d'équivalence de E suivant \mathcal{R} :

$$E/\mathcal{R} = \{ \text{Cl}_{\mathcal{R}}(x) \mid x \in E \}. \quad \square$$

N.B. Dans l'ensemble quotient E/\mathcal{R} , chaque classe $\text{Cl}_{\mathcal{R}}(x)$ est vue comme un élément. □

Exemple Soit $E = \mathbb{Z}$ et soit $n \in \mathbb{N}^*$ tel que $n > 1$. Pour $k, l \in \mathbb{Z}$, on définit $k\mathcal{R}l$ par $k \equiv l[n]$. Alors, chaque classe d'équivalence de E admet un unique représentant $k \in \{0, 1, \dots, n\}$. L'ensemble quotient E/\mathcal{R} , noté $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$, est constitué par n éléments $\{k + n\mathbb{Z}\}_{k \in \{0, 1, \dots, n\}}$. □