

ARITHMÉTIQUE

Solution 1

Dans ce qui suit toutes les congruences sont modulo 7.

Soient x et y divisibles par 7. Alors $x \equiv y \equiv 0$ et $x^2 + y^2 \equiv 0^2 + 0^2 \equiv 0$.

Pour la réciproque, supposons que $x^2 + y^2 \equiv 0^2 + 0^2 \equiv 0$. Or pour un carré il n'y a que quatre valeurs possibles 0, 1, 2 et 4. En effet :

- Si $x \equiv 0$ alors $x^2 \equiv 0$,
- Si $x \equiv \pm 1$ alors $x^2 \equiv 1$,
- Si $x \equiv \pm 2$ alors $x^2 \equiv 4$,
- Si $x \equiv \pm 3$ alors $x^2 \equiv 9 \equiv 2$.

Donc la somme de deux carrés ne peut être 0 modulo 7 que si $x \equiv y \equiv 0$.

Solution 2

1. On a modulo 17 :

$$7^2 \equiv 49 \equiv -2 \Rightarrow 7^4 \equiv (-2)^2 \equiv 4 \Rightarrow 7^8 \equiv 4^2 \equiv -1.$$

Ainsi

$$\begin{aligned} 7^{8n+1} + 10(-1)^n &\equiv 7(7^8)^n + 10(-1)^n \\ &\equiv 7(-1)^n + 10(-1)^n \\ &\equiv 17(-1)^n \equiv 0. \end{aligned}$$

2. On calcule modulo 11 :

$$\begin{aligned} 9^{5n+2} - 4 &\equiv (-2)^{5n+2} - 4 \equiv 4((-2)^5)^n - 4 \\ &\equiv 4[(-32)^n - 1] \equiv 4[1^n - 1] \equiv 0. \end{aligned}$$

3. Il est clair que pour tout $n \in \mathbb{N}$ le nombre $10^{3n+2} - 4^{n+1}$ est divisible par 2. Il suffit alors de montrer qu'il est également divisible par

3. On trouve modulo 3 :

$$10^{3n+2} - 4^{n+1} \equiv 1^{3n+2} - 1^{n+1} \equiv 1 - 1 \equiv 0.$$

Solution 3

Oui ! On calcule

$$\begin{aligned} a_1 &= 1 \\ a_5 &= 153 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_2 &= 3 \\ a_6 &= 873 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_3 &= 9 \\ a_7 &= 5913 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_4 &= 33 \\ a_8 &= 46233 \end{aligned}$$

On a $a_5 = 9 \times 17$, et puisque pour tout $k \geq 6$ la factorielle $k!$ est multiple de 9 on déduit

$$\forall n \geq 5 \quad a_n = a_5 + \sum_{k=6}^n k! \equiv 0 \pmod{9}.$$

On calcule

$$\frac{a_8}{9} = 5137.$$

Puisque 5137 n'est pas un multiple de trois on en déduit que a_8 n'est pas un multiple de 27. D'autre part pour tout $k \geq 9$ la factorielle $k!$ est multiple de 27.

$$\forall n \geq 8 \quad a_n = a_8 + \sum_{k=9}^n k! \equiv a_8 \not\equiv 0 \pmod{27}.$$

On peut donc affirmer que a_n est divisible par 9 et non-divisible par 27 à partir du rang $n = 8$.

Solution 4

On utilise la formule du binôme :

$$(n+1)^n - 1 = \sum_{k=1}^n \binom{n}{k} n^k$$

Dès que $k \geq 2$, n^2 divise n^k . De plus, $\binom{n}{1} = n$ donc n^2 divise tous les termes de la somme précédente et donc divise $(n+1)^n - 1$.

Solution 5

Raisonnons par récurrence sur n .

La propriété est évidente au rang $n = 0$. Supposons-la vraie à un certain rang $n \in \mathbb{N}$. Remarquons que

$$5^{2^{n+1}} - 1 = (5^{2^n})^2 - 1 = (5^{2^n} - 1)(5^{2^n} + 1)$$

D'après l'hypothèse de récurrence 2^{n+2} est la plus grande puissance de 2 divisant $5^{2^n} - 1$.

Montrons que 2 est la plus grande puissance de 2 divisant $5^{2^n} + 1$. On sait que $5 \equiv 1[4]$. Donc $5^{2^n} + 1 \equiv 2[4]$. Ceci prouve que 2 divise $5^{2^n} + 1$ mais que 4 ne le divise pas.

En conclusion, 2^{n+3} est la plus grande puissance de 2 divisant $5^{2^{n+1}} - 1$.

Solution 6

Soit a un entier. Soit a_0, a_1, \dots, a_n les chiffres composant a de sorte que $a = \sum_{k=0}^n a_k 10^k$.

1. On remarque que $10 \equiv 1[3]$. Donc pour tout $k \in \llbracket 0, n \rrbracket$, $10^k \equiv 1[3]$. Par conséquent, $a \equiv \sum_{k=0}^n a_k [3]$. On en déduit donc que a est divisible par 3 si et seulement si la somme de ses chiffres est divisible par 3.
2. On remarque que $10 \equiv 1[9]$. Donc pour tout $k \in \llbracket 0, n \rrbracket$, $10^k \equiv 1[9]$. Par conséquent, $a \equiv \sum_{k=0}^n a_k [9]$. On en déduit donc que a est divisible par 9 si et seulement si la somme de ses chiffres est divisible par 9.
3. On remarque que $10 \equiv -1[11]$. Donc pour tout $k \in \llbracket 0, n \rrbracket$, $10^k \equiv (-1)^k [11]$. Par conséquent, $a \equiv \sum_{k=0}^n (-1)^k a_k [11] \equiv \sum_{0 \leq 2k \leq n} a_k - \sum_{0 \leq 2k+1 \leq n} a_{2k+1} [11]$. On en déduit donc que a est divisible par 11 si et seulement si la somme de ses chiffres de rang pair moins la somme de ses chiffres de rang impair est divisible par 11.

Solution 7

$2^5 \equiv 2[5]$ et $2^3 \equiv 3[5]$ donc $2^{3n} \equiv 3^n [5]$. Par conséquent, $2^{3n+5} \equiv 2 \cdot 3^n [5]$. Enfin,

$$2^{3n+5} + 3^{n+1} \equiv 2 \cdot 3^n + 3 \cdot 3^n \equiv 0[5]$$

Solution 8

L'ensemble de l'énoncé est formé des entiers de la forme $u_n = \sum_{k=0}^n 10^k$ pour $n \in \mathbb{N}$. On a facilement $u_n = \frac{1}{9}(10^{n+1} - 1)$. Remarquons que si $p = 3$, alors p divise 111 par exemple.

Soit p un entier premier différent de 2, 3 et 5. Alors $10 = 2 \times 5$ est premier avec p . D'après le petit théorème de Fermat, $10^{p-1} \equiv 1 \pmod{p}$ donc p divise $10^{p-1} - 1$. Comme $p \neq 3$, p est premier avec 9. On sait que 9 divise $10^{p-1} - 1$ puisque $\frac{1}{9}(10^{p-1} - 1) = u_{p-2} \in \mathbb{N}$. Donc 9p divise $10^{p-1} - 1$ i.e. p divise u_{p-2} .

Solution 9

1. Soit $n \in \mathbb{N}$. Soit r le chiffre des unités de n . Il existe alors $m \in \mathbb{N}$ tel que $n = 10m + r$. On conclut en remarquant que $n \equiv r[5]$ puisque $10 \equiv 0[5]$ et que les seuls chiffres (i.e. entiers compris entre 0 et 9) divisibles par 5 sont 0 et 5.
2. Soit $n \in \mathbb{N}$. Soit r l'entier formé par les deux derniers chiffres de n . Il existe alors $m \in \mathbb{N}$ tel que $n = 100m + r$. On conclut en remarquant que $n \equiv r[4]$ puisque $100 \equiv 0[4]$.

Solution 10

On fixe un entier a impair et on fait l'hypothèse de récurrence suivante :

$$\text{HR}(n) : a^{2^{n-1}} \equiv 1 [2^n]$$

Initialisation : On sait que a est impair donc $a - 1$ et $a + 1$ sont pairs et $a^2 - 1 = (a - 1)(a + 1)$ est donc divisible par 4 i.e. $a^2 \equiv 1[4]$ de sorte que HR(2) est vraie.

Hérédité : Supposons HR(n) vraie pour un certain $n \in \mathbb{N}$. Alors $a^{2^{n-1}} - 1$ est divisible par 2^n . De plus $a^{2^{n-1}} + 1$ est pair car a est impair. Ainsi $a^{2^n} - 1 = (a^{2^{n-1}} - 1)(a^{2^{n-1}} + 1)$ est divisible par $2^n \times 2 = 2^{n+1}$ i.e. $a^{2^n} \equiv 1[2^{n+1}]$ de sorte que HR($n + 1$) est vraie.

Conclusion : Par récurrence, HR(n) est vraie pour tout entier $n \geq 2$.

Solution 11

Puisque 10 et 13 sont premiers entre eux, ils vérifient une relation de Bézout. En effet, $4 \times 10 - 3 \times 13 = 1$. Par conséquent, $12 \times 10 - 9 \times 13 = 3$ ou encore $122 = 2 + 12 \times 9 = 5 + 9 \times 13$. Ainsi 122 est solution particulière.

$$\begin{aligned} \begin{cases} x \equiv 2[10] \\ x \equiv 5[13] \end{cases} &\iff \begin{cases} x \equiv 122[10] \\ x \equiv 122[13] \end{cases} \\ &\iff \begin{cases} 10 \mid x - 122 \\ 13 \mid x - 122 \end{cases} \\ &\iff 130 \mid x - 122 \quad \text{car } 10 \wedge 13 = 1 \\ &\iff x \equiv 122[130] \end{aligned}$$

L'ensemble des solutions est donc $122 + 130\mathbb{Z}$.

Solution 12

1. Si le système admettait des solutions, il existerait $k, l \in \mathbb{Z}$ tel que $3 + 10k = 4 + 8l$ i.e. $10k - 8l = 1$. Ceci est impossible puisque 2 divise $10k - 8l$ et pas 1.
2. Le système admet des solutions si et seulement si il existe $(k, l) \in \mathbb{Z}^2$ tel que $a + 10k = b + 8l$ i.e. $10k - 8l = b - a$. Comme $10 \wedge 8 = 2$, ceci équivaut à $2 \mid b - a$.
3. On a $10 - 8 = 2$ et donc $-6 = 2 - 8 = 4 - 10$. Ceci signifie que -6 est une solution particulière.

$$\begin{aligned} \begin{cases} x \equiv 4[10] \\ x \equiv 2[8] \end{cases} &\iff \begin{cases} x \equiv -6[10] \\ x \equiv -6[8] \end{cases} \\ &\iff \begin{cases} 10 \mid x + 6 \\ 8 \mid x + 6 \end{cases} \\ &\iff 40 \mid x + 6 \quad \text{car } 10 \vee 8 = 40 \\ &\iff x \equiv -6[40] \end{aligned}$$

L'ensemble des solutions est donc $-6 + 40\mathbb{Z}$.

Solution 13

1. Le nombre $2^{2^{10}}$ est tellement grand qu'on ne peut pas effectuer cette division sans astuce (ou ordinateur). On essaie donc d'abord de voir ce qui se passe avec des exposants petits. On a les équivalences suivantes modulo 7 : $2^0 \equiv 1$, $2^1 \equiv 2$, $2^2 \equiv 2$ et $2^3 \equiv 1$. Donc il y a un cycle de longueur 3 pour les exposants. Ainsi je la division euclidienne de 2^{10} par 3,

$$2^{10} = 3q + r,$$

ce qui permet d'écrire

$$2^{2^{10}} \equiv 2^{3q+r} \equiv (2^3)^q \times 2^r \equiv 2^r \pmod{7}.$$

Il reste alors à déterminer ce reste r . Trois méthodes pour cela :

- Par calcul mental. $2^{10} = 1024 = 341 \times 3 + 1$.
- Les parésseux reconnaissent que 1023 est divisible par 3, donc le reste est 1.
- On écrit $2^{10} \equiv 2^{2 \times 5} \equiv (2^2)^5 \equiv 4^5 \equiv 1^5 \equiv 1 \pmod{3}$.

On obtient alors

$$2^{2^{10}} \equiv 2 \pmod{7}$$

ce qui prouve que reste de la division euclidienne de $2^{2^{10}}$ par 7 est 2.

2. Imitant la méthode ci-dessus nous cherchons une puissance 3^n équivalente à $\pm 1 \pmod{25}$.

$$\begin{aligned} 3^2 &\equiv 9, \quad 3^3 \equiv 2, \quad 3^4 \equiv 6, \quad 3^5 \equiv -7, \quad 3^6 \equiv 4, \\ 3^7 &\equiv 12, \quad 3^8 \equiv 11, \quad 3^9 \equiv 8, \quad 3^{10} \equiv -1 \pmod{25}. \end{aligned}$$

Comme $2189 = 10 \times 218 + 9$ on trouve

$$3^{2189} \equiv (3^{10})^{218} \times 3^9 \equiv (-1)^{218} \times 8 \equiv 8 \pmod{25}.$$

Solution 14

1. On a $a^n = a^r(a^{mq} - 1) + a^r$ et

$$a^{mq} - 1 = (a^m)^q - 1 = (a^m - 1) \sum_{k=0}^{q-1} (a^m)^k$$

donc $a^{mq} - 1$ est divisible par $a^m - 1$ et $a^n \equiv a^r[a^m - 1]$.

On peut également remarquer que $a^m \equiv 1[a^m - 1]$ donc $a^{qm} \equiv 1[a^m - 1]$ donc $a^{qm+r} \equiv a^r[a^m - 1]$ i.e. $a^n \equiv a^r[m-1]$.

2. Remarquons que

$$a^n - 1 \equiv a^r - 1[a^m - 1] \text{ et } 0 \leq a^r - 1 < a^m - 1$$

car $r < q$ et $a > 1$. Ainsi $a^r - 1$ est le reste de la division euclidienne de $a^n - 1$ par $a^m - 1$. Par conséquent,

$$d = (a^n - 1) \wedge (a^m - 1) = (a^m - 1) \wedge (a^r - 1).$$

On définit la suite d'entiers (r_k) par $r_0 = n$, $r_1 = m$ et si r_{k+1} est non nul, r_{k+2} est le reste de la division euclidienne de r_k par r_{k+1} i.e. on applique l'algorithme d'Euclide à n et m . On sait qu'il existe K tel que $r_K = n \wedge m$ et $r_{K+1} = 0$. D'après ce qui précède, on démontre par récurrence que $(a^{r_k} - 1)$ est la suite des entiers définis par l'algorithme d'Euclide appliqué à $a^n - 1$ et $a^m - 1$. Comme $a^{r_{K+1}} - 1 = 0$, c'est que $a^{r_K} - 1 = a^{n \wedge m} - 1$ est le pgcd de $a^n - 1$ et $a^m - 1$.

3. On peut utiliser le résultat de la question précédente. En effet, $a^m - 1$ divise $a^n - 1$ si et seulement si $(a^n - 1) \wedge (a^m - 1) = a^m - 1$, ou encore si et seulement si $a^{n \wedge m} - 1 = a^m - 1$. Comme $a > 1$, ceci équivaut à $n \wedge m = m$ i.e. m divise n .

On peut également utiliser le résultat de la première question. En effet, $a^n - 1 \equiv a^r - 1[a^m - 1]$. De plus, $0 \leq r < m$ donc $0 \leq a^r - 1 < a^m - 1$. Ainsi $a^r - 1$ est le reste de la division euclidienne de $a^n - 1$ par $a^m - 1$. Ainsi $a^m - 1$ divise $a^n - 1$ si et seulement si $a^r - 1 = 0$, ce qui équivaut à $r = 0$ (car $a > 1$) et donc à m divise n .

Solution 15

On peut considérer toutes les possibilités de reste de la division euclidienne de a par 8 mais la démonstration suivante montre que l'on peut se limiter aux restes modulo 4.

- Si $a \equiv 0[4]$, il existe $k \in \mathbb{Z}$ tel que $a = 4k$. Alors $a^2 = 16k^2 = 8 \times 2k^2 + 0$ et donc le reste est 0.
- Si $a \equiv 1[4]$, il existe $k \in \mathbb{Z}$ tel que $a = 4k + 1$. Alors $a^2 = 16k^2 + 8k + 1 = 8 \times (2k^2 + k) + 1$ et donc le reste est 1.
- Si $a \equiv 2[4]$, il existe $k \in \mathbb{Z}$ tel que $a = 4k + 2$. Alors $a^2 = 16k^2 + 16k + 4 = 8 \times (2k^2 + 2k) + 4$ et donc le reste est 4.
- Si $a \equiv 3[4]$, il existe $k \in \mathbb{Z}$ tel que $a = 4k + 3$. Alors $a^2 = 16k^2 + 24k + 9 = 8 \times (2k^2 + 3k + 1) + 1$ et donc le reste est 1.

Solution 16

On écrit la division euclidienne de $a - 1$ par b : $a - 1 = bq + r$ avec $0 \leq r \leq b - 1$. Pour $n \in \mathbb{N}$, on a donc

$$ab^n - b^n = b^{n+1}q + rb^n$$

Par conséquent,

$$ab^n - 1 = b^{n+1}q + (r + 1)b^n - 1$$

Par ailleurs, $0 \leq r \leq b - 1$ donc $1 \leq r + 1 \leq b$ et donc $0 \leq (r + 1)b^n - 1 \leq b^{n+1} - 1$. Ceci prouve que le quotient de la division euclidienne de $ab^n - 1$ par b^{n+1} est q .

Solution 17

On écrit $n^2 + 1 = (n - 1)(n + 1) + 2$. Ainsi dès que $n \geq 2$, 2 est le reste de la division euclidienne de $n^2 + 1$ par $n + 1$. 2 étant notoirement non nul, $n + 1$ ne divise pas $n^2 + 1$.

1 est le seul entier n tel que $n + 1$ divise $n^2 + 1$.

Solution 18

On remarque que $2^3 \equiv 1[7]$. De plus, $2 + 0 + 2 + 0 = 4$ donc $2020 \equiv 4 \equiv 1[3]$. Ainsi $2^{2020} \equiv 2^1[7]$. Comme $0 \leq 2 < 7$, le reste de la division euclidienne de 2^{2020} par 7 est 2.

Solution 19

D'après le théorème de Bezout, il existe un couple $(u, v) \in \mathbb{Z}^2$ tel que $au - bv = 1$. On effectue la division euclidienne de u par b et de v par a de sorte que $u = bq + u_0$ avec $0 \leq u_0 < b$ et $v = ar + v_0$ avec $0 \leq v_0 < a$. On a alors :

$$au - bv = ab(q - r) + au_0 - bv_0 = 1$$

On a de plus $0 \leq u_0 \leq b - 1$ et $0 \leq v_0 \leq a - 1$ donc $-ab + b \leq au_0 - bv_0 \leq ab - a$. On en déduit que

$$-ab + a + 1 \leq ab(q - r) \leq ab - b + 1$$

Comme $a \geq 0$ et $b \geq 2$, $-ab < ab(q - r) < ab$ et donc $-1 < q - r < 1$. C'est donc que $q = r$ et $au_0 - bv_0 = 1$.

Reste à montrer l'unicité. Soit $(u_1, v_1) \in \mathbb{N}^2$ vérifiant :

$$u_1 a - v_1 b = 1$$

$$u_1 < b$$

$$v_1 < a$$

On a alors $(u_1 - u_0)a = (v_1 - v_0)b$. Le théorème de Gauss nous dit que $u_1 - u_0$ est un multiple de b . Mais $-b < u_1 - u_0 < b$. C'est donc que $u_0 = u_1$. On démontre de même que $v_0 = v_1$.

Solution 20

1. On applique la méthode de résolution des équations diophantiennes du type $ax + by = c$.

Simplification par le pgcd Le pgcd de 221 et 247 est 13 (on le trouve en utilisant l'algorithme d'Euclide). L'équation est alors équivalente à $17x + 19y = 4$ avec 17 et 19 premiers entre eux.

Recherche d'une solution particulière Ici, on a clairement $-17 + 19 = 2$ donc $17 \times (-2) + 19 \times 2 = 4$. Le couple $(-2, 2)$ est donc une solution particulière.

Recherche de la solution générale

$$\begin{aligned} 17x + 19y = 4 &\iff 17x + 19y = 17 \times (-2) + 19 \times 2 \\ &\iff 17(x + 2) + 19(y - 2) = 0 \end{aligned}$$

Si (x, y) est solution, alors 19 divise $x + 2$ en vertu du théorème de Gauss. Par conséquent, il existe $k \in \mathbb{Z}$ tel que $x = -2 + 19k$. Mais on a alors $y = 2 - 17k$. Réciproquement, on vérifie que tout couple de la forme $(-2 + 19k, 2 - 17k)$ est bien solution.

L'ensemble des solutions est donc

$$\{(-2 + 19k, 2 - 17k), k \in \mathbb{Z}\}$$

2. On applique la méthode de résolution des équations diophantiennes du type $ax + by = c$.

Simplification par le pgcd Le pgcd de 323 et 391 est 17 (on le trouve en utilisant l'algorithme d'Euclide). L'équation est alors équivalente à $19x - 23y = 36$ avec 19 et 23 premiers entre eux.

Recherche d'une solution particulière Ici, on a clairement $-19 + 23 = 4$ donc $19 \times (-9) - 23 \times (-9) = 36$. Le couple $(-9, 9)$ est donc une solution particulière.

Recherche de la solution générale

$$\begin{aligned} 19x - 23y = 36 &\iff 19x - 23y = 19 \times (-9) - 23 \times (-9) \\ &\iff 19(x + 9) - 23(y + 9) = 0 \end{aligned}$$

Si (x, y) est solution, alors 23 divise $x + 9$ en vertu du théorème de Gauss. Par conséquent, il existe $k \in \mathbb{Z}$ tel que $x = -9 + 23k$. Mais on a alors $y = -9 + 19k$. Réciproquement, on vérifie que tout couple de la forme $(-9 + 23k, -9 + 19k)$ est bien solution.

L'ensemble des solutions est donc

$$\{(-9 + 23k, -9 + 19k), k \in \mathbb{Z}\}$$

3. On applique la méthode de résolution des équations diophantiennes du type $ax + by = c$.

Simplification par le pgcd Le pgcd de 198 et 216 est 18 (on le trouve en utilisant l'algorithme d'Euclide). L'équation est alors équivalente à $11x - 12y = 2$ avec 11 et 12 premiers entre eux.

Recherche d'une solution particulière Ici, on a clairement $-11 + 12 = 1$ donc $11 \times (-2) + 12 \times 2 = 2$. Le couple $(-2, 2)$ est donc une solution particulière.

Recherche de la solution générale

$$\begin{aligned} 11x + 12y = 2 &\iff 11x + 12y = 11 \times (-2) + 12 \times 2 \\ &\iff 11(x + 2) + 12(y - 2) = 0 \end{aligned}$$

Si (x, y) est solution, alors 12 divise $x + 2$ en vertu du théorème de Gauss. Par conséquent, il existe $k \in \mathbb{Z}$ tel que $x = -2 + 12k$. Mais on a alors $y = 2 - 11k$. Réciproquement, on vérifie que tout couple de la forme $(-2 + 12k, 2 + 11k)$ est bien solution.

L'ensemble des solutions est donc

$$\{(-2 + 12k, 2 + 11k), k \in \mathbb{Z}\}$$

Solution 21

Remarquons qu'aucun des entiers x, y, z ne peut être égal à 1. De plus, on ne peut avoir $x > 3, y > 3$ et $z > 3$ car sinon $\frac{1}{x} + \frac{1}{y} + \frac{1}{z} < 1$. Donc l'un des trois entiers est inférieur ou égal à 3. Supposons que ce soit x : on peut avoir $x = 2$ ou $x = 3$.

Cas $x = 2$: On a alors $\frac{1}{y} + \frac{1}{z} = \frac{1}{2}$. Comme auparavant, aucun des entiers y et z ne peut être égal à 2 et on ne peut avoir $y > 4$ et $z > 4$. L'un de ces deux entiers est donc inférieur ou égal à 4. Supposons que ce soit y .

Cas $y = 3$: On obtient $z = 6$.

Cas $y = 4$: On obtient $z = 4$.

Cas $x = 3$: On a alors $\frac{1}{y} + \frac{1}{z} = \frac{2}{3}$. On ne peut avoir $y > 3$ et $z > 3$. L'un de ces deux entiers est donc inférieur ou égal à 3. Supposons que ce soit y .

Cas $y = 2$: On obtient $z = 6$.

Cas $y = 3$: On obtient $z = 3$.

En conclusion, les solutions sont les triplets $(2, 3, 6), (2, 4, 4), (3, 3, 3)$ et toutes les permutations de ceux-ci.

Solution 22

Si (x, y) est un couple solution, alors $x(5x + 2y) = 3$ et donc x divise 3. Nécessairement $x \in \{\pm 1, \pm 3\}$.

- Si $x = 1$, alors l'équation devient $2 + 2y = 0$ i.e. $y = -1$.
- Si $x = -1$, alors l'équation devient $2 - 2y = 0$ i.e. $y = 1$.
- Si $x = 3$, alors l'équation devient $42 + 6y = 0$ i.e. $y = -7$.
- Si $x = -3$, alors l'équation devient $42 - 6y = 0$ i.e. $y = 7$.

Les couples solutions sont donc $(1, -1), (-1, 1), (3, -7), (-3, 7)$.

Solution 23

Soit $(n, m) \in \mathbb{N}^2$ un éventuel couple vérifiant $n(n + 1)(n + 2) = m^2$.

Si n est pair, il existe $p \in \mathbb{N}$ tel que $n = 2p$. On en déduit que

$$4p(2p + 1)(p + 1) = m^2$$

Ainsi 2 divise m^2 et donc m puisque 2 est premier. Il existe donc $q \in \mathbb{N}$ tel que $m = 2q$. On en déduit que

$$p(2p+1)(p+1) = q^2$$

Or p , $2p+1$ et $p+1$ sont premiers entre eux deux à deux (il existe des relations de Bézout évidentes entre ces entiers) et on prouve alors classiquement que p , $2p+1$ et $p+1$ sont des carrés d'entiers en considérant les puissances de leurs facteurs premiers dans leurs décompositions en facteurs premiers. En particulier, il existe des entiers naturels c et d tels que $p = c^2$ et $p+1 = d^2$. Ainsi $d^2 - c^2 = 1$ i.e. $(d+c)(d-c) = 1$. On en déduit $d - c = d + c = 1$ et donc $c = 0$ et $d = 1$. Il s'ensuit que $n = 0$ puis $m = 0$.

Si n est impair, il existe $p \in \mathbb{N}$ tel que $n = 2p+1$. On en déduit que

$$2(2p+1)(p+1)(2p+3) = m^2$$

Ainsi 2 divise m^2 et donc m puisque 2 est premier. Il existe donc $q \in \mathbb{N}$ tel que $m = 2q$. On en déduit que

$$(2p+1)(p+1)(2p+3) = 2q^2$$

Donc 2 divise $(2p+1)(p+1)(2p+3)$. Comme $2p+1$ et $2p+3$ sont impairs, 2 divise $p+1$ et donc p est impair. Il existe donc $r \in \mathbb{N}$ tel que $p = 2r+1$. Il s'ensuit que

$$(4r+3)(r+1)(4r+5) = q^2$$

$r+1$ est premier avec $4r+3$ et $4r+5$ en vertu de relations de Bézout évidentes. De plus $(4r+5) - (4r+3) = 2$ donc le pgcd de $4r+3$ et $4r+5$ vaut 1 ou 2. Puisque $4r+3$ et $4r+5$ sont impairs, leur pgcd vaut 1 i.e. ces entiers sont premiers entre eux. Finalement, $r+1$, $4r+3$ et $4r+5$ sont premiers entre eux deux à deux et sont donc des carrés d'entiers comme précédemment. En particulier, il existe des entiers naturels c et d tels que $4r+3 = c^2$ et $4r+5 = d^2$. Ainsi $d^2 - c^2 = 2$ i.e. $(d+c)(d-c) = 2$. On en déduit que $d - c = 1$ et $d + c = 2$ i.e. $c = \frac{1}{2}$ et $d = \frac{3}{2}$ ce qui contredit le fait que c et d sont des entiers.

On en déduit finalement que la seule solution de l'équation $n(n+1)(n+2) = m^2$ est le couple $(0, 0)$.

Solution 24

1. a. Soit d un diviseur positif commun à α, β, c . Alors d divise $a = \alpha + c$, $b = \beta + c$ et c . Puisque a, b, c sont premiers entre eux dans leur ensemble, $d = 1$, ce qui prouve que α, β, c sont premiers entre eux dans leur ensemble. Puisque (a, b, c) est une solution de (E), on en déduit $c(a+b) = ab$ ou encore $\alpha\beta = c^2$. Soit d un diviseur commun à α et β . Alors d^2 divise $\alpha\beta = c^2$. On en déduit que d divise c et donc d est un diviseur commun à α, β, c . Puisque α, β, c sont premiers entre eux dans leur ensemble, $d = 1$, ce qui prouve que α et β sont premiers entre eux.

- b. Remarquons tout d'abord que α et β sont des entiers naturels non nuls. En effet, puisque $\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{c}$, on a $\frac{1}{a} < \frac{1}{c}$ et $\frac{1}{b} < \frac{1}{c}$ puis $a > c$ et $b > c$. On va donc pouvoir considérer la décomposition en facteurs premiers de α et β .

Soit p un nombre premier. Puisque $\alpha\beta = c^2$, $v_p(\alpha) + v_p(\beta) = 2v_p(c)$. Puisque α et β sont premiers entre eux, l'un au moins des deux entiers $v_p(\alpha)$ et $v_p(\beta)$ est nul. L'autre est donc nécessairement pair. Finalement, les deux entiers $v_p(\alpha)$ et $v_p(\beta)$ sont pairs puisque 0 est pair.

Ainsi toutes les valuations apparaissant dans la décomposition en facteurs premiers de α et β sont paires, ce qui prouve que α et β sont des carrés.

Il existe donc des entiers naturels non nuls u et v tels que $\alpha = u^2$ et $\beta = v^2$. Alors $c^2 = \alpha\beta = u^2v^2$ donc $c = uv$. Ainsi $a = \alpha + c = (u+v)u$ et $b = \beta + c = (u+v)v$.

2. Soit $(a, b, c) \in (d\mathbb{N}^*)^3$ une solution de (E). Alors en posant $d = a \wedge b \wedge c$, $a' = \frac{a}{d}$, $b' = \frac{b}{d}$ et $c' = \frac{c}{d}$ sont premiers entre eux dans leur ensemble. Ce qui précède assure l'existence d'un couple $(u, v) \in (\mathbb{N}^*)^2$ tel que $a' = (u+v)u$, $b' = (u+v)v$ et $c' = uv$. On a donc $a = d(u+v)u$, $b = d(u+v)v$ et $c = duv$.

Réciproquement, soit $(d, u, v) \in (\mathbb{N}^*)^3$ et posons $a = d(u+v)u$, $b = d(u+v)v$ et $c = duv$. Alors

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{d(u+v)u} + \frac{1}{d(u+v)v} = \frac{v+u}{d(u+v)uv} = \frac{1}{duv} = \frac{1}{c}$$

donc (a, b, c) est solution de (E).

Finalement les solutions de (E) sont les triples de la forme $(d(u+v)u, d(u+v)v, duv)$ où $(d, u, v) \in (\mathbb{N}^*)^3$.

Solution 25

Soit $(n, m) \in \mathbb{N}^2$ une éventuelle solution. Alors $2^n = m^3 - 1 = (m - 1)(m^2 + m + 1)$. Puisque 2 est premier, $m - 1$ et $m^2 + m + 1$ sont des puissances de 2. Or $m^2 + m + 1 = m(m + 1) + 1$ est impair puisque $m(m + 1)$ est pair. Or la seule puissance de 2 impaire est $2^0 = 1$ donc $m^2 + m + 1 = 1$ i.e. $m = 0$ (on ne peut avoir $m = -1$ car $m \in \mathbb{N}$). Il vient alors $2^n = -1$, ce qui est absurde. L'équation $2^n + 1 = m^3$ d'inconnue $(n, m) \in \mathbb{N}^2$ n'admet donc pas de solution.

Solution 26

1.

$$\begin{cases} x \wedge y = 3 \\ x \vee y = 135 \end{cases} \iff \exists (x', y') \in \mathbb{Z}^2, \begin{cases} x = 3x', y = 3y' \\ x' \wedge y' = 1 \\ x'y' = 45 \end{cases}$$

Les couples (x', y') possibles sont $(1, 45)$, $(5, 9)$, $(9, 5)$ et $(45, 1)$. Ainsi les solutions sont $(3, 135)$, $(15, 27)$, $(27, 15)$ et $(135, 3)$.

2.

$$\begin{cases} x + y = 100 \\ x \wedge y = 10 \end{cases} \iff \exists (x', y') \in \mathbb{Z}^2, \begin{cases} x = 10x', y = 10y' \\ x' \wedge y' = 1 \\ x' + y' = 10 \end{cases}$$

Les couples (x', y') possibles sont $(1, 9)$, $(3, 7)$, $(7, 3)$ et $(9, 1)$. Ainsi les solutions sont $(10, 90)$, $(30, 70)$, $(70, 30)$ et $(90, 10)$.

Solution 27

1. On raisonne par récurrence.

Initialisation On a $F_0 F_2 - F_1^2 = -1 = (-1)^1$ donc la formule est vraie au rang 1.

Hérédité Supposons que $F_{n-1} F_{n+1} - F_n^2 = (-1)^n$ pour un certain $n \in \mathbb{N}^*$.

$$\begin{aligned} F_n F_{n+2} - F_{n+1}^2 &= F_n (F_{n+1} + F_n) - F_{n+1} (F_{n-1} + F_n) \\ &= F_n^2 - F_{n+1} F_{n-1} = -(-1)^n = (-1)^{n+1} \end{aligned}$$

La formule est donc également vraie au rang $n + 1$.

Conclusion La formule est vraie pour tout $n \in \mathbb{N}^*$.

On a donc une relation de Bézout entre F_n et F_{n-1} : ces deux entiers sont donc premiers entre eux.

2. On raisonne par récurrence sur n (et pas sur p). L'hypothèse de récurrence au rang $n \in \mathbb{N}$ est la suivante :

(H_n) : Pour tout $p \in \mathbb{N}^*$, $F_{n+p} = F_p F_{n+1} + F_{p-1} F_n$.

Initialisation On a pour tout $p \in \mathbb{N}^*$:

$$F_p F_1 + F_{p-1} F_0 = F_p$$

donc (H_0) est vraie.

Hérédité Supposons (H_n) pour un certain $n \in \mathbb{N}$. Soit $p \in \mathbb{N}^*$. Remarquons que $F_{(n+1)+p} = F_{n+(p+1)}$. Or $p + 1 \in \mathbb{N}^*$. On applique notre hypothèse de récurrence (H_n) :

$$\begin{aligned} F_{n+(p+1)} &= F_{p+1} F_{n+1} + F_p F_n \\ &= (F_p + F_{p-1}) F_{n+1} + F_p F_n \\ &= F_p (F_{n+1} + F_n) + F_{p-1} F_{n+1} \\ &= F_p F_{n+2} + F_{p-1} F_{n+1} \end{aligned}$$

Ceci étant vrai quelque soit le choix de p , on en déduit que (H_{n+1}) est vraie.

Conclusion Pour tout $n \in \mathbb{N}$, (H_n) est vraie.

Soit $(n, p) \in \mathbb{N} \times \mathbb{N}^*$.

- Soit d un diviseur commun de F_n et F_p . Comme $F_{n+p} = F_p F_{n+1} + F_{p-1} F_n$, d divise également F_{n+p} . Donc d est un diviseur commun de F_p et F_{n+p} .
- Réciproquement, soit d un diviseur commun de F_p et F_{n+p} . On en déduit que d divise $F_{p-1} F_n$. Or F_p et F_{p-1} sont premiers entre eux et d divise F_p , donc d et F_{p-1} sont également premiers entre eux. D'après le théorème de Gauss, d divise F_n . C'est donc un diviseur commun de F_n et F_p .

On en conclut que $F_n \wedge F_p = F_{n+p} \wedge F_p$.

3. Soit $(m, n) \in \mathbb{N}^2$. On effectue la division euclidienne de m par n : $m = nq + r$. En itérant le résultat de la question précédente, on a

$$F_n \wedge F_r = F_n \wedge F_{r+n} = F_n \wedge F_{r+2n} = \dots = F_n \wedge F_{r+nq} = F_n \wedge F_m$$

On conclut grâce à l'algorithme d'Euclide. Soit $d = m \wedge n$. Notons $a_0, \dots, a_m = d$ la suite des restes non nuls obtenus par l'algorithme d'Euclide. D'après ce qui précède,

$$F_m \wedge F_n = F_n \wedge F_{a_0} = F_{a_0} \wedge F_{a_1} = \dots = F_{a_m} \wedge F_0 = F_d$$

Solution 28

Soit d un diviseur commun à a et bc . Par conséquent d divise bc . Mais d divise a qui est premier avec b . Donc d est premier avec b . Par le théorème de Gauss, d divise donc c . Finalement, d est un diviseur commun à a et c .

Réciproquement, soit d un diviseur commun à a et c . Il est alors évident que d est aussi un diviseur commun de a et bc .

On conclut donc que $a \wedge bc = a \wedge c$.

Solution 29

Il existe $(a', b') \in \mathbb{Z}^2$ tels que $a = da'$ et $b = db'$ et $a' \wedge b' = 1$. On a alors $m = da'b'$ puis

$$(a + b) \wedge m = d[(a' + b') \wedge a'b'].$$

Nous allons montrer que $(a' + b') \wedge a'b' = 1$. Supposons par l'absurde que $a'b'$ et $a' + b'$ admettent un diviseur premier commun p . Comme a' et b' sont premiers entre eux, $p|a'b'$ implique soit $p|a'$ soit $p|b'$. Quitte à changer leurs rôles on peut supposer que $p|a'$. Comme d'autre part $p|a' + b'$, on déduit que $p|b'$. Ainsi p est un diviseur premier commun de a' et b' , ce qui contredit que $a' \wedge b' = 1$. Ainsi $(a' + b') \wedge a'b' = 1$ et finalement $(a + b) \wedge m = d$.

REMARQUE. On peut également se passer du lemme d'Euclide et utiliser le théorème de Bezout pour montrer que $(a' + b') \wedge a'b' = 1$. Comme $a' \wedge b' = 1$, il existe $(u, v) \in \mathbb{Z}^2$ tel que $a'u + b'v = 1$. En élevant au carré, on obtient $a'^2 u^2 + b'^2 v^2 + 2a'b'uv = 1$. Or $a'^2 = a'(a' + b') - a'b'$ et $b'^2 = b'(a' + b') - a'b'$ de sorte que

$$(a' + b')(a'u^2 + b'v^2) + a'b'(2uv - u^2 - v^2) = 1$$

Cette relation de Bezout permet d'affirmer que $(a' + b') \wedge a'b' = 1$.

Solution 30

Par un changement d'indice

$$\begin{aligned} 2 \sum_{k=1}^{b-1} \left\lfloor \frac{ka}{b} \right\rfloor &= \sum_{k=1}^{b-1} \left\lfloor \frac{ka}{b} \right\rfloor + \sum_{k=1}^{b-1} \left\lfloor \frac{(b-k)a}{b} \right\rfloor \\ &= \sum_{k=1}^{b-1} \left\lfloor \frac{ka}{b} \right\rfloor + \left\lfloor a - \frac{ka}{b} \right\rfloor \end{aligned}$$

- Si $\frac{ka}{b}$ est entier, alors

$$\left\lfloor \frac{ka}{b} \right\rfloor + \left\lfloor a - \frac{ka}{b} \right\rfloor = a$$

- Sinon

$$\left\lfloor \frac{ka}{b} \right\rfloor + \left\lfloor a - \frac{ka}{b} \right\rfloor = a - 1$$

Il reste donc à trouver le nombre d'entier $k \in \llbracket 1, b-1 \rrbracket$ tel que $\frac{ka}{b}$ soit entier.

Posons $d = a \wedge b$, $a' = \frac{a}{d}$ et $b' = \frac{b}{d}$ de sorte que $a' \wedge b' = 1$. Soit $k \in \llbracket 1, b-1 \rrbracket$. Alors $\frac{ka}{b} = \frac{ka'}{b'}$. Ainsi $\frac{ka}{b}$ est entier si et seulement si k est un multiple de b' . Or il existe exactement $d-1$ multiples de b' compris entre 1 et $b-1$. Il s'ensuit que

$$2 \sum_{k=1}^{b-1} \left\lfloor \frac{ka}{b} \right\rfloor = (d-1)a + ((b-1) - (d-1))(a-1) = ab - a - b + d$$

On en déduit l'inégalité voulue.

Solution 31

Supposons les a_i premiers entre eux à deux. On suppose que les b_i possèdent un diviseur premier commun p . Notamment p divise b_1 donc il existe $j \in \llbracket 2, r \rrbracket$ tel que p divise a_j d'après le lemme d'Euclide. Mais p divise également b_j donc il existe $k \in \llbracket 1, r \rrbracket \setminus \{j\}$ tel que p divise a_k toujours d'après le lemme d'Euclide. Ainsi p divise a_j et a_k et $k \neq j$. Puisque $a_j \wedge a_k = 1$, a_j et a_k n'ont pas de diviseur premier commun d'où une contradiction. Ainsi les b_i ne possèdent pas de diviseur premier commun : il sont donc premiers entre eux dans leur ensemble.

Supposons maintenant les b_i premiers entre eux dans leur ensemble. Soit $(j, k) \in \llbracket 1, r \rrbracket^2$ tel que $j \neq k$. Posons $d = a_j \wedge a_k$. Puisque d divise a_j , d divise b_i pour tout $i \in \llbracket 1, r \rrbracket \setminus \{j\}$. De même, d divise a_k donc d divise b_i pour tout $i \in \llbracket 1, r \rrbracket \setminus \{k\}$. Finalement, d divise tous les b_i et donc leur pgcd, à savoir 1. Ainsi $d = 1$ et a_j et a_k sont premiers entre eux.

Solution 32

1. Soient m et n deux entiers premiers entre eux. Si d_1 est un diviseur de m et d_2 est un diviseur de n , $d_1 d_2$ est un diviseur de mn . Réciproquement, soit d un diviseur de mn . Posons

$$d_1 = d \wedge m \text{ et } d_2 = d \wedge n.$$

d_1 et d_2 sont respectivement des diviseurs de m et n qui sont premiers entre eux : ils sont donc aussi premiers entre eux. De plus, d_1 et d_2 divisent d donc $d_1 d_2$ divise d . On écrit les relations de Bezout suivantes

$$d_1 = u_1 d + v_1 m \text{ et } d_2 = u_2 d + v_2 n$$

Par conséquent,

$$d_1 d_2 = v_1 v_2 mn + (u_1 u_2 d + v_1 m u_2 + v_2 n u_1) d$$

Comme d divise mn , d divise $d_1 d_2$ et finalement, $d = d_1 d_2$.

Les diviseurs de mn sont exactement les produits d'un diviseur de m et d'un diviseur de n . Montrons que ces produits sont tous distincts. Soient d_1 et d'_1 des diviseurs de m , d_2 et d'_2 des diviseurs de n tels que $d_1 d_2 = d'_1 d'_2$. Comme m et n sont premiers entre eux, d_1 et d'_2 sont premiers entre eux. Donc d_1 divise d'_1 . De la même manière, d'_1 divise d_1 donc $d_1 = d'_1$ et $d_2 = d'_2$.

$$\begin{aligned} S(mn) &= \sum_{d|mn} d = \sum_{d_1|m, d_2|n} d_1 d_2 \\ &= \left(\sum_{d_1|m} d_1 \right) \left(\sum_{d_2|n} d_2 \right) = S(m)S(n) \end{aligned}$$

2. a. Soit d un diviseur de p . Il existe donc $k \in \mathbb{N}$ tel que $p = kd$.

$$2^p - 1 = 2^{kd} - 1 = (2^d)^k - 1 = (2^d - 1) \sum_{l=0}^{k-1} 2^{ld}$$

Or $2^p - 1$ est premier donc $2^d - 1$ vaut 1 ou $2^p - 1$ et d vaut 1 ou p , ce qui prouve que p est premier.

- b. En utilisant la première question,

$$S(n) = S(2^{p-1})S(2^p - 1)$$

car la relation de Bezout $2 \times 2^{p-1} - (2^p - 1) = 1$ prouve que 2^{p-1} et $2^p - 1$ sont premiers entre eux.

Les diviseurs de 2^{p-1} sont les 2^k avec $0 \leq k \leq p-1$ donc

$$S(2^{p-1}) = \sum_{k=0}^{p-1} 2^k = 2^p - 1$$

De plus, $2^p - 1$ est premier par hypothèse donc ses seuls diviseurs sont 1 et lui même donc

$$S(2^p - 1) = 1 + 2^p - 1 = 2^p$$

Finalement on a bien $S(n) = 2^p(2^p - 1) = 2n$.

3. Soit n un nombre parfait pair. Notons $p - 1$ l'exposant de 2 dans la décomposition de n en facteurs premiers. Ainsi $n = 2^{p-1}m$ où m est impair. Comme n est pair, $p \geq 2$. De plus, $S(n) = S(2^{p-1})S(m)$ car m et 2 sont premiers entre eux. Or $S(n) = 2n = 2^p m$ par hypothèse et $S(2^{p-1}) = 2^p - 1$. Ainsi $2^p m = (2^p - 1)S(m)$. Comme $2^p - 1$ et 2^p sont premiers entre eux, 2^{p-1} divise m et 2^p divise $S(m)$. Il existe donc $k \in \mathbb{N}^*$ tel que $m = (2^p - 1)k$ et $S(m) = 2^p k$. Comme $p \geq 2$, $2^p - 1 \neq 1$. Ainsi k et $m = (2^p - 1)k$ sont des diviseurs de m distincts. Donc $S(m) \geq k + (2^p - 1)k = 2^p k$. Or $S(m) = 2^p k$ donc k et $m = (2^p - 1)k$ sont les seuls diviseurs de m . Ceci prouve que m est premier et que k vaut 1. Ainsi $m = 2^p - 1$ et p est premier d'après une question précédente.

Solution 33

1. On peut écrire m sous la forme $2^n k$ où k est impair donc de la forme $2l + 1$. Remarquons que

$$X^{2l+1} + 1 = (X + 1) \sum_{i=0}^{2l} (-1)^i X^i.$$

En spécialisant cette relation pour $X = 2^m$, on obtient :

$$2^m + 1 = (2^{2^n})^{2l+1} + 1 = (2^{2^n} + 1) \sum_{i=0}^{2l} (-1)^i (2^{2^n})^i.$$

Ainsi $2^{2^n} + 1$ est un diviseur de $2^m + 1$ distinct de 1 car $k \geq 1$ et de $2^m + 1$ si $k \neq 1$. C'est donc que $k = 1$ et m est bien de la forme 2^n . On pouvait également remarquer que $2^{2^n} \equiv -1[2^{2^n} + 1]$ et donc $2^{2^n k} \equiv -1[2^{2^n} + 1]$ car k est impair. Ainsi $2^m + 1 \equiv 0[2^{2^n} + 1]$ i.e. $2^{2^n} + 1$ divise $2^m + 1$. Puisque $2^m + 1$ est premier, $2^{2^n} + 1 = 1$ ou $2^{2^n} + 1 = 2^m + 1$. Le premier cas est impossible : c'est donc que $2^{2^n} + 1 = 2^m + 1$, ce qui implique $m = 2^n$.

2. On peut supposer $m > n$.

$$\begin{aligned} F_m &= 2^{2^m} + 1 + \sum_{k=1}^{2^{m-n}} (-1)^k 2^{2^m - k 2^n} \\ &\quad - \sum_{k=1}^{2^{m-n}} (-1)^k 2^{2^m - k 2^n} \\ &= 2 + \sum_{k=0}^{2^{m-n}-1} (-1)^k 2^{2^m - k 2^n} \\ &\quad + \sum_{k=1}^{2^{m-n}} (-1)^{k-1} 2^{2^m - k 2^n} \\ &= 2 + \sum_{k=0}^{2^{m-n}-1} (-1)^k 2^{2^n} 2^{2^m - (k+1)2^n} \\ &\quad + \sum_{k=1}^{2^{m-n}} (-1)^{k-1} 2^{2^m - k 2^n} \\ &= 2 + \sum_{k=1}^{2^{m-n}} (-1)^{k-1} 2^{2^n} 2^{2^m - k 2^n} \\ &\quad + \sum_{k=1}^{2^{m-n}} (-1)^{k-1} 2^{2^m - k 2^n} \\ &= 2 + \sum_{k=1}^{2^{m-n}} (-1)^{k-1} (2^{2^n} + 1) 2^{2^m - k 2^n} \\ &= 2 + F_n \sum_{k=1}^{2^{m-n}} (-1)^{k-1} 2^{2^m - k 2^n} \end{aligned}$$

Ainsi $F_m \wedge F_n$ divise 2. Comme F_n et F_m sont impairs, $F_m \wedge F_n = 1$.

A nouveau, on pouvait raisonner par congruences. En effet, $2^{2^n} \equiv -1[F_n]$. En élevant à la puissance 2^{m-n} , on obtient $2^{2^m} \equiv 1[F_n]$ car 2^{m-n} est pair ($m > n$). Il s'ensuit que $F_m \equiv 2[F_n]$. Par conséquent, $F_m \wedge F_n$ divise 2. Comme F_m est impair, $F_m \wedge F_n = 1$.

Solution 34

1. Soit $k \in \llbracket 1, p-1 \rrbracket$. On sait que $k \binom{p}{k} = p \binom{p-1}{k-1}$. Donc p divise $k \binom{p}{k}$. Comme p est premier et que $1 \leq k \leq p-1$, k et p sont premiers entre eux. Par conséquent, p divise $\binom{p}{k}$ en vertu du théorème de Gauss.
2. On démontre le résultat par récurrence sur n .

Initialisation $0^p - 0 = 0$ est clairement divisible par p .

Hérédité Supposons que $n^p - n$ soit divisible par n pour un certain $n \in \mathbb{N}$. Alors

$$\begin{aligned} (n+1)^p - (n+1) &= \left(\sum_{k=0}^p \binom{p}{k} n^k \right) - (n+1) \\ &= n^p - n + \sum_{k=1}^{p-1} \binom{p}{k} n^k \end{aligned}$$

Tous les termes de la somme sont divisibles par p d'après la question précédente et $n^p - n$ l'est également d'après l'hypothèse de récurrence. Donc $(n+1)^p - (n+1)$ est aussi divisible par p .

Conclusion Pour tout entier $n \in \mathbb{N}$, $n^p - n$ est divisible par p (i.e. $n^p \equiv n[p]$).

Solution 35

1. Puisque $a \equiv 1[a-1]$, $a^r \equiv 1[a-1]$ i.e. $a-1$ divise $a^r - 1$. Comme $a^r - 1$ est premier, on a deux possibilités :

- $a-1 = 1$ i.e. $a = 2$,
- $a-1 = a^r - 1$ ce qui entraîne $a = 1$ ou $r = 1$, ce qui est contraire aux hypothèses.

Soit p un diviseur positif de r . Alors il existe $q \in \mathbb{N}$ tel que $r = pq$. Alors $2^p \equiv 1[2^p - 1]$ donc $2^r = 2^{pq} \equiv 1[2^p - 1]$ i.e. $2^p - 1$ divise $2^r - 1$. Comme $2^r - 1$ est premier, on a $2^p - 1 = 1$ i.e. $p = 1$ ou $2^p - 1 = 2^r - 1$ i.e. $p = r$. Les seuls diviseurs positifs de r sont donc 1 et r et, comme $r \geq 2$, on peut affirmer que r est premier.

2. La réciproque est fausse puisque $2^{11} - 1 = 23 \times 89$.

Solution 36

1. a. Il existe donc $b \in \mathbb{N}^*$ tel que $n = ab$. On factorise $2^n - 1$ de la manière suivante :

$$2^n - 1 = (2^a)^b - 1 = (2^a - 1) \sum_{k=0}^{b-1} 2^{ka}$$

Ainsi $2^a - 1$ divise M_n .

On peut également remarquer que $2^a \equiv 1[2^a - 1]$ donc $2^{ab} \equiv 1[2^a - 1]$. Ainsi $2^a - 1$ divise M_n .

- b. On suppose M_n premier. Soit a un diviseur positif de n . La question précédente montre que $2^a - 1$ divise M_n . M_n étant premier, on a donc $2^a - 1 = 1$ i.e. $a = 1$ ou $2^a - 1 = 2^n - 1$ i.e. $a = n$. Les seuls diviseurs positifs de n sont donc 1 et n , ce qui prouve que n est premier.
2. a. $M_p = 2 \times 2^{p-1} - 1$. Comme $p-1 \geq 0$, M_p est impair. Donc q est impair. Ainsi $2 \wedge q = 1$. En appliquant le petit théorème de Fermat, on a donc $2^q \equiv 2[q]$. Ainsi q divise $2^q - 2 = 2(2^{q-1} - 1)$. Comme q est impair $q \wedge 2 = 1$ et donc q divise $2^{q-1} - 1$ i.e. $2^{q-1} \equiv 1[q]$.
- b. A est une partie non vide de \mathbb{N} puisque $q-1 \in A$. A admet donc un minimum.
- c. Soit r le reste de la division euclidienne de p par m . Comme $2^p \equiv 1[q]$ et $2^m \equiv 1[q]$, $2^r \equiv 1[q]$. Or $0 \leq r < m$ et $m = \min A$. C'est donc que $r = 0$. Ainsi m divise p . Comme p est premier, on a donc $m = 1$ ou $m = p$. Puisque $2^1 \not\equiv 1[q]$, c'est donc que $m = p$.

- d. Notons à nouveau r le reste de la division euclidienne de $q-1$ par p . Comme $2^{q-1} \equiv 1[p]$ et $2^p \equiv 1[p]$, $2^r \equiv 1[p]$. Or $0 \leq r < p$ et $p = \min A$. C'est donc que $r = 0$. Ainsi p divise $q-1$ i.e. $q \equiv 1[p]$.
- e. Comme q est impair, $q-1$ est pair i.e. 2 divise $q-1$. On vient de voir que p divise également $q-1$. p étant impair, 2 et p sont premiers entre eux et donc $2p$ divise $q-1$ i.e. $q \equiv 1[2p]$.

3. Si $n = 1$, on a évidemment $n \equiv 1[2p]$. Sinon n peut s'écrire sous la forme $n = \prod_{i=1}^r q_i$ où les q_i sont des nombres premiers. Soit $i \in \llbracket 1, r \rrbracket$. q_i divise n et donc M_p . La question précédente montre que $q_i \equiv 1[2p]$. En multipliant membre à membre ces congruences, on obtient $n \equiv 1[2p]$.

REMARQUE. Les démonstrations à coup de divisions euclidiennes sont assez lourdes. Vous verrez comment simplifier grandement ces démonstrations en deuxième année en utilisant la notion d'ordre d'un élément d'un groupe – en l'occurrence le groupe $(\mathbb{Z}/p\mathbb{Z})^*$.

Solution 37

Soient p et q deux nombres premiers consécutifs avec $p < q$.

Si $p = 2$, alors $q = 3$ et $p + q = 5$ ne peut être le produit de deux nombres premiers.

Si $p > 2$, alors p et q sont impairs donc $p + q$ est pair. Supposons qu'il existe deux nombres premiers a et b tels que $p + q = ab$. Comme $p + q$ est pair, un des deux nombres premiers a et b est égal à 2 par unicité de la décomposition en facteurs premiers. Supposons sans perte de généralité que $a = 2$. Alors $b = \frac{p+q}{2}$ est un nombre premier strictement compris entre p et q , ce qui contredit le fait que p et q sont des nombres premiers consécutifs.

Solution 38

Il existe $c \in \mathbb{N}^*$ tel que $ab = c^n$.

Soit p un nombre premier. Alors $v_p(ab) = v_p(c^n)$ i.e. $v_p(a) + v_p(b) = nv_p(c)$. Puisque $a \wedge b = 1$, p ne peut être un facteur commun de a et b : on a donc $v_p(a) = 0$ ou $v_p(b) = 0$. Dans les deux cas, $v_p(a)$ et $v_p(b)$ sont des multiples de n .

Il existe donc deux familles d'entiers naturels presque nulles $(\alpha_p)_{p \in \mathcal{P}}$ et $(\beta_p)_{p \in \mathcal{P}}$ telles que pour tout $p \in \mathcal{P}$, $v_p(a) = n\alpha_p$ et $v_p(b) = n\beta_p$. On a alors

$$a = \prod_{p \in \mathcal{P}} p^{n\alpha_p} = \left(\prod_{p \in \mathcal{P}} p^{\alpha_p} \right)^n \quad \text{et} \quad b = \prod_{p \in \mathcal{P}} p^{n\beta_p} = \left(\prod_{p \in \mathcal{P}} p^{\beta_p} \right)^n$$

Ainsi a et b sont des puissances $n^{\text{èmes}}$ d'entiers.

Solution 39

1. On a $n = 2k + 1$ pour un certain $k \in \mathbb{Z}$. Ainsi $n^2 = (2k + 1)^2 = 4k(k + 1) + 1$. L'un des deux nombres k ou $k + 1$ est un multiple de 2 , ce qui entraîne que $4k(k + 1)$ est un multiple de 8 , donc $n^2 \equiv 1[8]$.
2. D'après la question précédente on sait déjà que 8 divise $p^2 - 1$ car p est impair. Comme p n'est pas divisible par 3 , on a $p \equiv \pm 1[3]$, donc $p^2 \equiv 1[3]$. Ainsi 8 et 3 divisent $p^2 - 1$, et donc $8 \vee 3 = 24$ divise aussi $p^2 - 1$.

Solution 40

A l'aide de MAPLE par exemple, on constate que u_1 se termine par deux chiffres 9, u_2 par quatre chiffres 9, u_3 par huit chiffres 9... On fait alors la conjecture que u_n se termine par 2^n chiffres 9. On utilise alors la remarque suivante : l'écriture décimale d'un entier N se termine au moins par p chiffres 9 si et seulement si $N + 1$ est divisible par 10^p (en effet, $\sum_{k=0}^{p-1} 9 \cdot 10^k = 10^p - 1$). Soit donc HR(n) l'hypothèse de

récurrence $u_n + 1$ est divisible par 10^{2^n} .

HR(0) est clairement vraie. Supposons HR(n) pour un certain $n \in \mathbb{N}$. Il existe donc $p \in \mathbb{N}$ tel que $u_n = -1 + 10^{2^n} p$. On a alors après développement et simplification

$$\begin{aligned} u_{n+1} &= -1 + 6(10^{2^n} p)^2 - 8(10^{2^n} p)^3 + 3(10^{2^n} p)^4 \\ &= -1 + 6 \cdot 10^{2^{n+1}} p^2 - 8 \cdot 10^{3 \cdot 2^n} p^3 + 3 \cdot 10^{2^{n+2}} p^4 \\ &= -1 + 10^{2^{n+1}} (6p^2 - 8 \cdot 10^{2^n} p^3 + 3 \cdot 10^{2^{n+1}} p^4) \end{aligned}$$

Ainsi $10^{2^{n+1}}$ divise $u_{n+1} + 1$ et HR($n + 1$) est vraie.

Par conséquent HR(n) est vraie pour tout $n \in \mathbb{N}$. Notamment pour $n = 11$, on peut affirmer que l'écriture décimale de u_1 se termine par au moins 2^{11} chiffres 9. Or $2^{11} = 2048 > 2010$.

Solution 41**Avec le programme de première année :**

Pour $k \in \llbracket 1, n \rrbracket$, notons η_k le reste de la division euclidienne de $\sum_{j=1}^k x_j$ par n . Si un des restes est nul, c'est terminé. Sinon, ces n restes sont dans l'ensemble $\llbracket 1, n-1 \rrbracket$ qui est de cardinal $n-1$ donc deux des restes sont égaux. Il existe donc $(k, l) \in \llbracket 1, n \rrbracket^2$ tel que $k < l$ et $\eta_k = \eta_l$. Mais alors $\sum_{j=1}^l x_j - \sum_{j=1}^k x_j = \sum_{j=k+1}^l x_j$ est divisible par n .

Avec le programme de seconde année :

Pour $k \in \llbracket 1, n \rrbracket$, notons c_k la classe de $\sum_{j=1}^k x_j$ modulo n . Si une des classes est nulle, c'est terminé. Sinon, ces n classes sont dans $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z} \setminus \{0\}$ qui est de cardinal $n-1$ donc deux des classes sont égales. Il existe donc $(k, l) \in \llbracket 1, n \rrbracket^2$ tel que $k < l$ et $c_k = c_l$. Mais alors $\sum_{j=1}^l x_j - \sum_{j=1}^k x_j = \sum_{j=k+1}^l x_j$ est divisible par n .

Solution 42

Soit $(a_0, \dots, a_{n-1}) \in \llbracket 0, b-1 \rrbracket^n$. Alors

$$0 \leq \sum_{k=0}^{n-1} a_k b^k \leq \sum_{k=0}^{n-1} (b-1) b^k = b^n - 1$$

Ceci prouve que φ est bien définie.

Puisque $\text{card}(\llbracket 0, b-1 \rrbracket^n) = \text{card}(\llbracket 0, b^n-1 \rrbracket) = b^n$, il suffit de montrer l'injectivité ou la surjectivité de φ pour établir sa bijectivité. Montrons par exemple l'injectivité de φ .

Soient (a_0, \dots, a_{n-1}) et (c_0, \dots, c_{n-1}) deux n -uplets distincts de $\llbracket 0, b-1 \rrbracket^n$. Notons j le plus grand indice tel que $a_j \neq c_j$. Alors

$$\begin{aligned} |\varphi(a_0, \dots, a_{n-1}) - \varphi(c_0, \dots, c_{n-1})| &= \left| \sum_{k=0}^j a_k b^k - \sum_{k=0}^j c_k b^k \right| \\ &\geq |a_j - c_j| b^j - \left| \sum_{k=0}^{j-1} (a_k - c_k) b^k \right| \\ &\geq |a_j - c_j| b^j - \sum_{k=0}^{j-1} |a_k - c_k| b^k \text{ par inégalité triangulaire} \end{aligned}$$

Or $a_j - c_j$ est un entier non nul donc $|a_j - c_j| \geq 1$. De plus, $|a_k - c_k| \leq b-1$ pour tout $k \in \llbracket 0, j-1 \rrbracket$. Il s'ensuit que

$$|\varphi(a_0, \dots, a_{n-1}) - \varphi(c_0, \dots, c_{n-1})| \geq b^j - \sum_{k=0}^{j-1} (b-1) b^k = 1$$

En particulier, $\varphi(a_0, \dots, a_{n-1}) \neq \varphi(c_0, \dots, c_{n-1})$, ce qui prouve l'injectivité de φ et, par suite, sa bijectivité.

Solution 43

Soient a et b tels que $(aabb)_{10}$ soit un carré d'entier. Autrement dit il existe $n \in \mathbb{N}$ tel que $1100a + 11b = n^2$. Mais $1100a + 11b = 11(100a + b)$ donc 11 divise n^2 et donc n puisque 11 est premier. On en déduit que 11 divise $100a + b$. Autrement dit $100a + b \equiv 0[11]$. Mais $100 \equiv 1[11]$ donc $a + b \equiv 0[11]$. Mais a et b sont des chiffres donc appartiennent à $\llbracket 0, 9 \rrbracket$. On a donc $a + b = 0$ ou $a + b = 11$.

Si $a + b = 0$, alors $a = b = 0$ et 0 est bien un carré d'entier.

Si $a + b = 11$, alors il faut explorer les différents cas en tenant compte du fait que a et b appartiennent à $\llbracket 0, 9 \rrbracket$.

- Si $a = 2$ et $b = 9$, 2299 n'est pas un carré d'entier.
- Si $a = 3$ et $b = 8$, 3388 n'est pas un carré d'entier.
- Si $a = 4$ et $b = 7$, 4477 n'est pas un carré d'entier.
- Si $a = 5$ et $b = 6$, 5566 n'est pas un carré d'entier.
- Si $a = 6$ et $b = 5$, 6655 n'est pas un carré d'entier.
- Si $a = 7$ et $b = 4$, 7744 est un carré d'entier.
- Si $a = 8$ et $b = 3$, 8833 n'est pas un carré d'entier.
- Si $a = 9$ et $b = 2$, 9922 n'est pas un carré d'entier.

Finalement, les deux seuls nombres s'écrivant en base 10 sous la forme $(aabb)_{10}$ sont 0 et 7744.