

Chapitre 26

Structures affines

Résumé -

Un espace affine est un espace vectoriel translaté (ou encore avec une origine ailleurs qu'en 0). Une autre façon de penser le lien espace vectoriel/espace affine consiste à faire un faire un parallèle avec le lien base $\mathcal{B} = (\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ (d'un espace vectoriel) / repère $\mathcal{R} = (O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ (d'un espace affine).

Après avoir vu quelques généralités sur les espaces affines, nous nous concentrerons sur les deux exemples typiques de notre programme :

- L'ensemble des solutions d'un système d'équation linéaire non homogène.
(Nous pouvons également penser aux solutions d'une équation différentielles linéaire avec second membre...)
- L'espace affine géométrique \mathbb{R}^2 ou \mathbb{R}^3 ...

Sommaire

1. Problèmes	550
2. Introduction	551
3. Translatés d'un sous-espace vectoriel	551
3.1. Translation (linéaire)	551
3.2. (Sous-)Espaces affines	552
3.3. Exemples variées	553
4. Systèmes d'équations linéaires	554
4.1. Contextes	554
4.2. Interprétations	554
4.3. Structure de l'ensemble des solutions	555
5. Equations, intersections et parallélisme	556
5.1. Cas général	556
5.2. Dans un plan (espace de dimension 2)	557
5.3. Dans un espace de dimension 3	557
6. Bilan	559

1. Problèmes

?

Problème 114 - Droite linéaire vs. droite affine

La géométrie (classique) permet de voir les espaces vectoriels.

Une droite linéaire $\{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid y = ax\}$ est un sous-espace vectoriel de dimension 1 de \mathbb{R}^2 .

En géométrie classique, il y a aussi dans l'espace \mathbb{R}^2 des sous-ensembles non sev, appelés droites affine : $\{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid y = ax + b\}$. Elle est "parallèle" à la droite précédente, mais décalée (translatée) de b (ordonnée à l'origine).

Comment peut-on, de la même façon, découper un espace vectoriel en mille-feuille : l'une est vectoriel, les autres affines et parallèles ?

?

Problème 115 - Structure affine de l'ensemble des solutions d'un problème linéaire

A tous les problèmes linéaires nous pouvons associer une structure d'espace vectoriel.

L'ensemble des inconnues est l'espace vectoriel et le problème code une application linéaire.

Lorsqu'il s'agit de trouver les racines du problèmes (solutions lorsque le second membre est nul), on se trouve en présence d'un noyau d'applications linéaires.

Exemple : trouver (u_n) telle que $\forall n \in \mathbb{N}$, $u_{n+3} - u_{n+1} + u_n = 0$.

L'espace est $E = \mathbb{K}^{\mathbb{N}}$, l'application linéaire est $\Phi : (u_n) \mapsto (v_n)$ avec $\forall n \in \mathbb{N}$, $v_n = u_{n+3} - u_{n+1} + u_n$. Il s'agit de trouver $\text{Ker } \Phi$.

Mais si le second membre est non nul, quelle est la structure de l'ensemble des solutions ?

Exemple : trouver (u_n) telle que $\forall n \in \mathbb{N}$, $u_{n+3} - u_{n+1} + u_n = n + 2$.

?

Problème 116 - Réciproquement

Si la géométrie permet de mieux voir les espaces et définir les espaces affines, on peut espérer que les structures algébriques permettent réciproquement de mieux comprendre la géométrie.

Que peut-on dire de l'intersection de trois hyperplans affines dans l'espace ? Est-il possible de coder ce problème sous forme de système à résoudre ? De quelle façon, le rang du système nous informe sur l'ensemble intersecté ?

?

Problème 117 - Espaces quotients et supplémentaires

On note pour F sev de E et $a \in E$, \mathcal{F} l'espace affine $a + F$.

Ainsi $b \in \mathcal{F} \iff \exists f \in F$ tel que $b = a + f \iff b - a \in F$.

On définit ainsi une relation d'équivalence : $a \mathcal{R}_F b$.

Que peut-on dire de l'espace affine \mathcal{F} en terme de classe d'équivalence de a pour \mathcal{R}_F ?

Si H est supplémentaire de F dans E , on a H est un système de représentants de classes pour \mathcal{R}_F .

Réiproquement, peut-on exploiter cette relation, pour créer un espace vectoriel \mathcal{F} , « supplémentaire » (d'une certaine façon) à F dans E ?

2. Introduction

Soit E un \mathbb{K} -espace vectoriel ($\mathbb{K} = \mathbb{R}$ ou \mathbb{C}).

Heuristique - Addition (et soustraction) affine

Si $A, B \in E$, on note $\overrightarrow{AB} = B - A \in \vec{E}$. On a alors

$$\begin{aligned}\overrightarrow{AB} &= \vec{0} \Leftrightarrow A = B \\ B &= A + \vec{u} \Leftrightarrow \vec{u} = \overrightarrow{AB} \\ \overrightarrow{BA} &= -\overrightarrow{AB} \\ \overrightarrow{AB} + \overrightarrow{BC} &= \overrightarrow{AC}\end{aligned}$$

Pour aller plus loin - Principe et notation

On va s'intéresser à la structure affine de E , c'est-à-dire que les éléments de E vont être repérés par rapport à une origine et considérés comme des « points » (on les notera de préférence en majuscule dans ce cas). Les éléments de E « espace vectoriel », seront noté de préférence en minuscule avec une flèche, et on peut, pour faire la différence, noter \vec{E} l'ensemble E quand il est considéré comme espace vectoriel. D'autre fois, E est l'espace vectoriel considéré et \mathcal{E} un espace affine associé...

Heuristique - Repère affine

On appelle alors repère affine de E tout couple (Ω, \mathcal{B}) d'un point Ω de E (l'origine du repère) et d'une base \mathcal{B} de \vec{E} . Si $\mathcal{B} = (\vec{e}_1, \dots, \vec{e}_n)$ alors tout point X de E s'écrit de manière unique sous la forme $X = \Omega + \sum_{i=1}^n x_i \vec{e}_i$; on dit que les x_i sont les coordonnées du point X dans le repère affine, ce sont également les coordonnées du vecteur $\overrightarrow{\Omega X}$ dans la base \mathcal{B} . (Le choix d'une origine permet « d'identifier » E et \vec{E} .)

3. Translatés d'un sous-espace vectoriel

3.1. Translation (linéaire)

Soit $(E, +, \cdot)$ un K -e.v.

Définition - Translation

Soit $a \in E$. On appelle translation de vecteur a l'application

$$\begin{aligned}t_a : \quad E &\rightarrow E \\ x &\mapsto x + a\end{aligned}$$

Proposition - Le groupe des translations $\mathcal{T}(E)$

On note $\mathcal{T}(E)$ l'ensemble des translations de E . Alors $(\mathcal{T}(E), \circ)$ est un groupe commutatif.

En particulier

- Id_E est la translation de vecteur nul.
- $t_a \circ t_b = t_b \circ t_a = t_{a+b}$.
- t_a est bijective de bijection réciproque t_{-a}

Démonstration

On notera bien, pour ce qui suit, que nous ne définissons jamais (ici) un espace affine, mais seulement des sous-espaces affines (à partir d'un espace vectoriel).

3.2. (Sous-)Espaces affines

Définition - Sous-espace affine (d'un espace vectoriel)

Soit $\mathcal{F} \subset E$, autrement écrit : \mathcal{F} une partie de E .

On dit que \mathcal{F} est un sous-espace affine de E s'il existe $a \in E$ et F sous-espace vectoriel de E tels que

$$\mathcal{F} = t_a(F) = \{a + f ; f \in F\}$$

On note alors $\mathcal{F} = a + F$ et on dit que le s.e.v F est la direction du s.e.a. \mathcal{F} .

STOP Remarque - Eléments de \mathcal{F}

D'après la définition, les éléments de \mathcal{F} sont des éléments de E donc des vecteurs!

Et pourtant la « tradition » veut qu'on appelle ces éléments des points. On les notera souvent avec une lettre majuscule.

STOP Remarque - Autre notation

Si on note un s.e.a. F , on notera sa direction \vec{F} .

STOP Remarque - Unicité de \mathcal{F}

La définition parle de LA direction F . Faut-il comprendre qu'il est unique?

Démonstration

Définition - Cas particuliers

Soit \mathcal{F} un sous-espace affine de E de direction F . On dit que \mathcal{F} est

- un point (ou un singleton réduit à un point) si $F = \{0_E\}$,
- une droite affine si F est une droite vectorielle,
- un plan affine si F est un plan vectoriel,
- un hyperplan affine si F est un hyperplan vectoriel.

Application - Représentation graphique dans \mathbb{R}^2 ou dans \mathbb{R}^3

Exemple - Cas particuliers

Proposition - Expression d'un s.e.a.

Si \mathcal{F} est un s.e.a de E de direction F ,
alors pour tout $a \in \mathcal{F}$ on a $\mathcal{F} = a + F$.

Démonstration**3.3. Exemples variées**

Les résultats suivant sont déjà connus, mais il s'interprète de manière tout à fait naturel dans le langage des espaces affines.

Equation simple**Théorème - Résolution d'une équation linéaire $u(x) = b$**

Soient $u \in \mathcal{L}(E, F)$ et $b \in F$. On note $S_{\mathcal{E}}$ l'ensemble des solutions de l'équation (\mathcal{E}) : $u(x) = b$.

- Si $b \notin \text{Im } u$ alors $S_{\mathcal{E}} = \emptyset$.
- Si $b \in \text{Im } u$ alors $S_{\mathcal{E}} \neq \emptyset$ et si x_0 est une solution particulière de (\mathcal{E}) alors

$$S_{\mathcal{E}} = \{x_0 + y; y \in \text{Ker } u\}.$$

$S_{\mathcal{E}}$ est un sous-espace affine de E de direction $\text{Ker } u$.

Equations différentielles

Pour l'exercice suivant on donnera une base à l'espace directeur (ce qui donne aussi la valeur de la dimension de l'espace affine des solutions).

Exercice

- Exprimer l'ensemble des solutions de l'équation

$$y' + \cos x \times y = 1 + \tan^2 x + \sin x$$

- Exprimer l'ensemble des solutions de l'équation

$$-3y'' + 4y' - y = \sin x$$

Pour aller plus loin - Linéaire+second membre

Tout les problèmes linéaires avec second membre se résolvent de la même façon :

- on cherche une solution particulière (point de translation)
- on cherche l'espace vectoriel des solutions du problème (linéaire) homogène.

La somme forme l'espace affine des solutions recherchées

Partout...**Exercice**

Trouver les suites (u_n) vérifiant :

$$\forall n \in \mathbb{N}, \quad u_{n+2} + u_{n+1} - 6u_n = 2$$

Exercice

Trouver l'ensemble des polynômes tels que $P(1) = 1$, $P(2) = 2$, $P(3) = 3$ et $P(4) = 5$.

Problème d'interpolation de Lagrange.

Exercice

Trouver l'ensemble des nombres N tels que $N \equiv 1[3]$, $N \equiv 2[5]$, $N \equiv 4[7]$ et $N \equiv 1[11]$.
Problème des restes chinois.

4. Systèmes d'équations linéaires

4.1. Contextes

 **Pour aller plus loin - Module affine**

Sur ce dernier exercice, il ne s'agit pas a proprement parlé d'espace affine et espace vectoriel mais de module, car l'ensemble est défini (pour la loi externe) sur l'anneau \mathbb{Z} et non un corps \mathbb{K} . On parle alors de module

En forme de rappels :

Définition - Vocabulaire

On considère le système de n équations à p inconnues :

$$(S) \left\{ \begin{array}{l} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1p}x_p = b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2p}x_p = b_2 \\ \vdots \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \cdots + a_{np}x_p = b_n \end{array} \right.$$

La matrice $A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1p} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{np} \end{pmatrix} \in \mathcal{M}_{n,p}(K)$ s'appelle la matrice du système, $B = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix} \in \mathcal{M}_{n,1}(K)$ est la matrice colonne des coordonnées du second membre $b = (b_1, b_2, \dots, b_n) \in K^n$.

On appelle système homogène associé à (S) le système

$$(S_H) \left\{ \begin{array}{l} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1p}x_p = 0 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2p}x_p = 0 \\ \vdots \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \cdots + a_{np}x_p = 0 \end{array} \right.$$

Définition - Compatibilité du système

Le système est dit compatible si l'ensemble des solutions est non vide.

 **Remarque - Rang du système**

On appelle rang du système (S) le rang de la matrice A .

4.2. Interprétations

Les résultats et propositions qui suivent découlent du cours précédent, ce qui change est leur interprétation (en fait, « le point de vue s'élargit »). Cela ne mérite donc, de manière générale, aucune démonstration.

Proposition - Interprétation linéaire

Soit $u \in \mathcal{L}(\mathbb{K}^p, \mathbb{K}^n)$ définie par

$$u: \begin{array}{ccc} \mathbb{K}^p & \rightarrow & \mathbb{K}^n \\ \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_p \end{pmatrix} & \mapsto & \begin{pmatrix} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1p}x_p \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2p}x_p \\ \vdots \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \cdots + a_{np}x_p \end{pmatrix} \end{array}$$

et $b = (b_1, b_2, \dots, b_n)$. Alors

$(x_1, \dots, x_p) \in \mathbb{K}^p$ est solution de $(S) \Leftrightarrow u(x) = b$

Le système est compatible si et seulement si $b \in \mathfrak{I} u$.

Proposition - Rang du système

Le rang du système (S) est égal au rang de $u : \text{rg } (S) = \text{rg } (A) = \text{rg } (u)$.

Proposition - Interprétation duale

Considérons les n formes linéaires φ_i sur \mathbb{K}^p définies par

$$\varphi_i: \begin{array}{l} \mathbb{K}^p \rightarrow \mathbb{K} \\ (x_1, \dots, x_p) \mapsto a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \cdots + a_{ip}x_p \end{array}$$

Alors

$(x_1, \dots, x_p) \in \mathbb{K}^p$ est solution de $(S) \Leftrightarrow \forall i \in \{1, \dots, n\}, \varphi_i(x) = b_i$

L'ensemble des solutions du système homogène est alors $\text{Ker } \varphi_1 \cap \dots \cap \text{Ker } \varphi_n$.

4.3. Structure de l'ensemble des solutions

On note \mathbb{S}_0 l'ensemble des solutions du système homogène associé et \mathbb{S} l'ensemble des solutions du système (S) .

Théorème - Dimension de l'espace vectoriel \mathbb{S}_0

\mathbb{S}_0 est un \mathbb{K} -espace vectoriel de dimension $p - \text{rg } (S)$.

Théorème - Résolution de système. Interprétation affine.

Si (S) est compatible, alors il existe une solution particulière x_0 .

Dans ce cas,

$$\mathbb{S} = \{x_0 + y; y \in \mathbb{S}_0\}$$

et \mathbb{S} est un espace affine de dimension $p - \text{rg } (S)$.

Un tel système a $\text{rg } (S)$ inconnues principales et $p - \text{rg } (S)$ inconnues secondaires.

Exercice

Résoudre le système

$$\left\{ \begin{array}{cccccc} 2x_1 & -2x_2 & +x_3 & -5x_4 & +3x_5 & = & 8 \\ 2x_2 & -4x_3 & -9x_4 & +7x_5 & = & 6 \\ -6x_1 & +7x_2 & -6x_3 & +11x_4 & -7x_5 & = & -23 \\ 2x_1 & -5x_2 & +14x_3 & +5x_4 & +3x_5 & = & 13 \end{array} \right.$$

5. Equations, intersections et parallélisme

5.1. Cas général

Intersection

Proposition - Intersection de sous-espaces affines

Soient \mathcal{F} et \mathcal{G} deux sous-espaces affines de directions respectives F et G .

Si $\mathcal{F} \cap \mathcal{G} \neq \emptyset$ alors $\mathcal{F} \cap \mathcal{G}$ est un s.e.v de direction le s.e.v $F \cap G$.

Démonstration

Si $F \cap G = \{0\}$, i.e. $F \oplus G$:

Corollaire - Espaces supplémentaires

Soient \mathcal{F} et \mathcal{G} deux sous-espaces affines de directions respectives F et G vérifiant $F \oplus G = E$. Alors $\mathcal{F} \cap \mathcal{G}$ est un singleton.

Remarque - Hypothèse superflue?

Il faudrait également montrer que $\mathcal{F} \cap \mathcal{G} \neq \emptyset$.

Mais le fait que la somme $F + G$ donne E implique que $\mathcal{F} \cap \mathcal{G} \neq \emptyset$, d'après un des exercices du chapitre...

Définition - Sous-espaces affines parallèles

On dit que le sous-espace affine \mathcal{F} est parallèle au sous-espace affine \mathcal{G} si $F \subset G$.

On dit que deux sous espaces affines \mathcal{F} et \mathcal{G} sont parallèles si $F = G$.

Attention - Relation d'équivalence. Relation d'ordre

Etre parallèle n'est donc pas une relation d'équivalence (non symétrique).

Mais il s'agit d'une pseudo-relation d'ordre (légère difficulté : on parle des espaces affines, et on a une égalité sur les espaces vectoriels, dans le cas de l'antisymétrie).

Par ailleurs, la relation n'est clairement pas totale

Exercice

Que pensez-vous de $\mathcal{F} + \mathcal{G}$?

Equations

Proposition - Equation d'un hyperplan affine

Soit $\mathcal{R} = (\Omega, e_1, \dots, e_n)$ un repère affine de l'espace E de dimension n . Alors

- Un hyperplan affine \mathcal{H} de E possède au moins une équation dans \mathcal{R} du type :

$$\sum_{i=1}^n a_i x_i = h \text{ avec } (a_1, \dots, a_n) \neq (0, \dots, 0). \quad (*)$$

- Réciproquement la relation (*) est l'équation d'un hyperplan affine dont la direction admet pour équation cartésienne

$$\sum_{i=1}^n a_i x_i = 0.$$

- Deux équations de la forme (*) représentent le même hyperplan affine si et seulement si elles sont proportionnelles.

Démonstration

5.2. Dans un plan (espace de dimension 2)

On retrouve les résultats du plan usuel, qui sont généralisable à tout espace (affine) de dimension 2 (comme par exemple, l'espace des suites récurrentes linéaires d'ordre 2)

Théorème - Equation de droites

Soit $(\Omega, \vec{e}_1, \vec{e}_2)$ un repère du plan. Alors

- Toute droite possède une équation cartésienne de la forme $ax+by+c=0$ où $a, b, c \in \mathbb{R}$, $(a, b) \neq (0, 0)$, $\vec{u}(-b, a)$ en est un vecteur directeur.
- Réciproquement, toute équation cartésienne de ce type décrit une droite.
- Deux telles équations représentent la même droite si et seulement si elles sont proportionnelles.

Définition - Equation paramétrique

Soit $(\Omega, \vec{e}_1, \vec{e}_2)$ un repère du plan. Alors une droite possède des équations paramétriques (ou une représentation paramétrique) de la forme

$$\begin{cases} x = x_0 + tu_1 \\ y = y_0 + tu_2 \end{cases} \quad t \in \mathbb{R}$$

Il s'agit alors de la droite passant par $M_0(x_0, y_0)$ et de vecteur directeur $\vec{u}(u_1, u_2)$.

Démonstration

Proposition - Droites parallèles

Deux droites affines du plan sont parallèles si elles ont même direction et, si elles ne sont pas parallèles, leur intersection est réduite à un point.

5.3. Dans un espace de dimension 3

Comme précédemment, dans le cas où l'espace vectoriel directeur est de dimension 1 (droite dans l'espace) :

Définition - Représentation paramétrique d'une droite

Soit $(\Omega, \vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3)$ un repère quelconque de l'espace. Alors une droite possède des équations paramétriques (ou une représentation paramétrique) de la forme

$$\begin{cases} x = x_0 + t u_1 \\ y = y_0 + t u_2 \\ z = z_0 + t u_3 \end{cases} \quad t \in \mathbb{R}$$

Il s'agit alors de la droite passant par $M_0(x_0, y_0, z_0)$ et de vecteur directeur $\vec{u}(u_1, u_2, u_3)$.

Comme précédemment, dans le cas où l'espace vectoriel directeur est de dimension 2 (plan dans l'espace) :

Définition - Représentation paramétrique d'un plan

Soit $(\Omega, \vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3)$ un repère quelconque de l'espace. Alors un plan possède des équations paramétriques (ou une représentation paramétrique) de la forme

$$\begin{cases} x = x_0 + t u_1 + s v_1 \\ y = y_0 + t u_2 + s v_2 \\ z = z_0 + t u_3 + s v_3 \end{cases} \quad (t, s) \in \mathbb{R}^2$$

Il s'agit alors du plan passant par $M_0(x_0, y_0, z_0)$ et de vecteurs directeurs $\vec{u}(u_1, u_2, u_3)$ et $\vec{v}(v_1, v_2, v_3)$ (Attention : \vec{u} et \vec{v} doivent être linéairement indépendants, sinon il s'agit d'une droite).

Théorème - Equation cartésienne d'un plan

Soit $(\Omega, \vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3)$ un repère de l'espace. Alors

- Tout plan possède une équation cartésienne de la forme $ax + by + cz + d = 0$ où $a, b, c \in \mathbb{R}$, $(a, b, c) \neq (0, 0, 0)$.
- Réciproquement, toute équation cartésienne de ce type décrit un plan.

Démonstration**Proposition - Equations cartésiennes d'une droite**

Soient deux plans d'équations respectives

$ax + by + cz + d = 0$ et $a'x + b'y + c'z + d' = 0$. Alors

- Si (a, b, c) et (a', b', c') sont proportionnels, alors \mathcal{P} et \mathcal{P}' sont parallèles (i.e. ont le même plan vectoriel comme direction, ou les mêmes vecteurs directeurs).
De plus si (a, b, c, d) et (a', b', c', d') sont proportionnels alors $\mathcal{P} = \mathcal{P}'$, sinon $\mathcal{P} \cap \mathcal{P}' = \emptyset$.
- Si (a, b, c) et (a', b', c') ne sont pas proportionnels, alors $\Delta = \mathcal{P} \cap \mathcal{P}'$ est une droite.
$$\begin{cases} ax + by + cz + d = 0 \\ a'x + b'y + c'z + d' = 0 \end{cases}$$
 s'appelle un système d'équations cartésiennes de Δ .

⚠️ Attention - Parallélisme et intersection

⚠️ Dans l'espace de dimension 3,

- deux droites sont parallèles si elles ont des vecteurs directeurs colinéaires,
- deux plans sont parallèles s'ils ont le même plan vectoriel pour direction,
- une droite peut être parallèle à un plan si son vecteur directeur appartient à la direction du plan,
- mais il est incorrect de dire qu'un plan est parallèle à une droite,
- l'intersection d'une droite \mathcal{D} non parallèle à un plan \mathcal{P} , et du plan \mathcal{P} est un point.

6. Bilan

Synthèse

- ~~> Les structures affines sont des milles-feuilles d'espaces vectoriels qui ne contiennent pas nécessairement le vecteur nul. Cela permet d'offrir une liberté aux mathématiciens.
- ~~> Cela s'applique dans de nombreux domaines : nous nous concentrerons ici uniquement sur les systèmes d'équations linéaires et sur la géométrie de dimension 2 ou 3.

Savoir-faire et Truc & Astuce du chapitre

Notations

Notations	Définitions	Propriétés	Remarques
\mathcal{F}	Espace affine, défini par un sous-espace F et a un « point » quelconque de F	$\mathcal{F} = a + F$	

Retour sur les problèmes

114. Cours

115. La suite u définie par $\forall n \in \mathbb{N}, u_n = An + B$.

$$u_{n+3} - u_{n+1} + u_n = A(n+3 - n - 1 + n) + B(1 - 1 + 1) = An + (B + 2A).$$

Donc avec $A = 1$ et $B = 0$, on a une solution particulière.

On note a, b, \bar{b} les trois racines (complexes) de l'équation caractéristique associée.

L'espace vectoriel des solutions de l'équation homogène est $E = \text{vect}((a^n), (b^n), (\bar{b}^n))$

L'ensemble des solutions du problème est donc l'espace affine : $u + E$.

116. Le rang du système nous donne la codimension de l'espace vectoriel qui dirige l'espace affine en question : 2 ou 1 voir 0. (En fait ce qui compte, c'est la dimension du noyau).

Il faut également trouver un point d'intersection comme origine de l'espace affine solution.

117. $\mathcal{F} = \bar{a}_{\mathcal{R}_F}$.

L'étude sur H , en découle.

