



PROJET DE FIN D'ÉTUDES

pour obtenir le diplôme de

l'UNIVERSITÉ GALATASARAY

Spécialité : **Mathématiques**

Formalisation du théorème de Desargues en Lean

Rapport 2

Préparé par **Abdullah Uyu**

Résponsable : **Can Ozan Oğuz**

5 novembre 2023

Table des matières

Table des matières	1
1 Introduction	2
2 Explications sur les résultats requis de la géométrie projective	3
1 Première rencontre	3
2 Projectivisation d'un espace vectoriel	4
3 Isomorphismes	5
3 Formalisation	7
1 Regrouper le point et les axiomes	8
2 Instances	9
Références	9

Chapitre 1

Introduction

Motivation Lean est un assistant de preuve. La transcription d'une preuve en langage humain dans un assistant de preuve est appelée *formalisation*. Lean dispose d'une grande bibliothèque de preuves, y compris de nombreuses preuves du niveau de licence, appelée *mathlib4*. Dans cette bibliothèque, il y a d'importants théorèmes manquants, et le théorème de Desargues est l'un d'entre eux.

Objectifs du Projet Les deux aspects principaux de ce projet sont l'apprentissage des rudiments de la théorie des géométries projectives, et de la programmation en Lean. Avec ces deux aspects, le but ultime est de formaliser le théorème de Desargues dans Lean.

Chapitre 2

Explications sur les résultats requis de la géométrie projective

1 Première rencontre

Pour motiver les géométries projectives, on commence par considérer les droites passant par l'origine dans le plan. On peut représenter la plupart de ces lignes par des points sur l'axe $y = 1$.

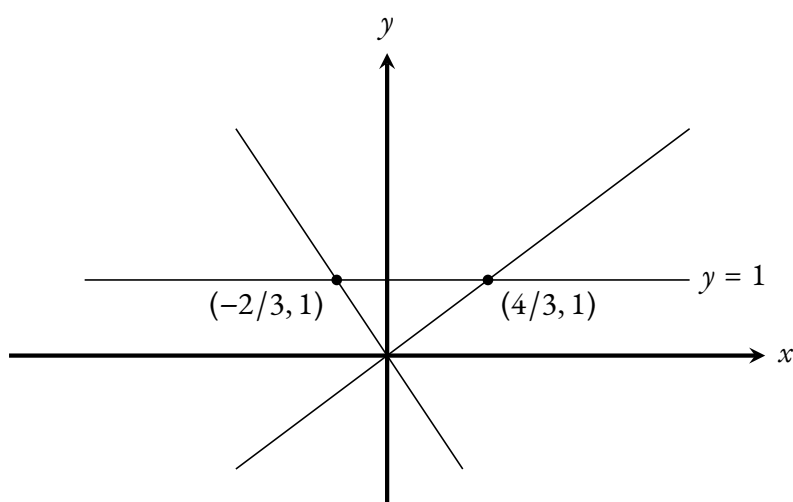


FIGURE 1 – La représentation des droites passant par l'origine dans le plan

La seule droite que l'on n'a pas réussi à représenter est l'axe x . On notera également que l'on peut bien sûr choisir n'importe quel axe pour la représentation, à l'exception de ceux qui passent par l'origine. Cette impossibilité dans les cas d'exception est clairement visible sur la [figure 1](#). Si l'on choisit un tel axe, la droite que l'on ne parviendra pas à représenter sera la droite (passant par l'origine) qui est parallèle à cet axe.

Effectuons la même procédure pour l'espace. On peut représenter la plupart des droites passant par l'origine par des points sur le plan $z = 1$.

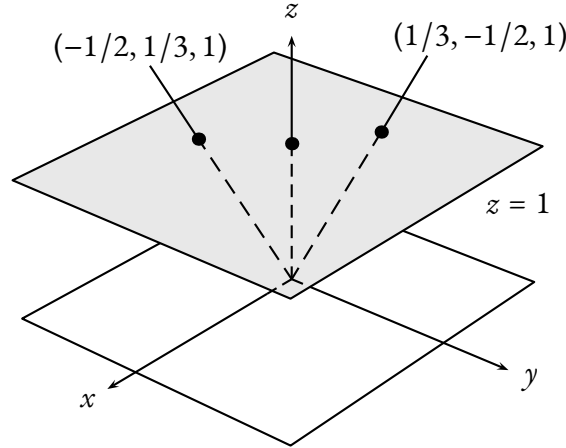


FIGURE 2 – La représentation des droites passant par l'origine dans l'espace

Maintenant, les seules droites que nous ne pouvons pas représenter sont exactement les droites du plan que nous avons représenté précédemment. La remarque sur le choix de l'axe de représentation s'étend ici comme tout plan ne passant pas par l'origine peut être utilisé. De plus, le plan irreprésentable sera celui (qui passe par l'origine) qui est parallèle au plan de représentation.

Ce processus s'appelle la *projectivisation d'un espace vectoriel*. Écrivons-le en langage d'algèbre linéaire.

2 Projectivisation d'un espace vectoriel

Définition 1 ([FF00, p. 27]). Soit V un espace vectoriel. Sur $V^\bullet := V \setminus \{0\}$, on définit une relation binaire comme suit : $x \sim y$ si et seulement si x, y sont linéairement dépendants. Comme ceci est une relation d'équivalence, l'ensemble quotient $\mathcal{P}(V) := V^\bullet / \sim$ est bien défini. $\mathcal{P}(V)$ est appelée la *projectivisation de l'espace vectoriel V* .

La motivation ci-dessus peut donc être formulée comme suit :

$$\begin{aligned} \mathcal{P}(\mathbf{R}^3) &= \mathcal{P}(\mathbf{R}^2 \times \mathbf{R}) \\ &\cong \mathbf{R}^2 \dot{\cup} \mathcal{P}(\mathbf{R}^2) \\ &= \mathbf{R}^2 \dot{\cup} \mathcal{P}(\mathbf{R} \times \mathbf{R}) \\ &\cong \mathbf{R}^2 \dot{\cup} \mathbf{R} \dot{\cup} \mathcal{P}(\mathbf{R}). \end{aligned}$$

Cela résume ce que l'on fait mathématiquement lorsque l'on fait des dessins en perspective : On prend un plan (\mathbf{R}^2), on choisit un horizon (\mathbf{R}) et un point de fuite ($\mathcal{P}(\mathbf{R})$). La proposition suivante n'est qu'une généralisation de ce processus.

Proposition 1 ([FF00, p. 28]). Pour un K -espace vectoriel V , il existe une bijection naturelle

$$s : \mathcal{P}(V \times K) \rightarrow V \dot{\cup} \mathcal{P}(V)$$

induite par la fonction $t : (V \times K)^\bullet \rightarrow V \dot{\cup} \mathcal{P}(V)$ définie par $t(x, \xi) = \xi^{-1}x$ si $\xi \neq 0$ et $t(x, 0) = [x]$ pour $x \neq 0$, où $[x]$ désigne le point de $\mathcal{P}(V)$ représenté par x .

Définition 2 ([FF00, p. 26]). Une *géométrie projective* est un ensemble G accompagné d'une relation ternaire $\ell \subseteq G \times G \times G$ telle que les axiomes suivants sont satisfaits :

(L₁) $\ell(a, b, a)$ pour tout $a, b \in G$.

(L₂) $\ell(a, p, q), \ell(b, p, q)$ et $p \neq q \implies \ell(a, b, p)$.

(L₃) $\ell(p, a, b)$ et $\ell(p, c, d) \implies \ell(q, a, c)$ et $\ell(q, b, d)$ pour un $q \in G$.

Les éléments de G sont appelés les *points* de la géométrie. Et trois points a, b, c sont dits *colinéaires* si $\ell(a, b, c)$.

Notons l'exemple le plus important pour une géométrie projective. Lors d'une **discussion** sur la chaîne de Zulip de Lean, Joseph Myers a conseillé d'énoncer le théorème sur cet exemple, mais pas sur la définition abstraite d'une géométrie projective. De plus, il est noté que la version du théorème en géométrie euclidienne, qui est probablement même connue de nombreux élèves du lycée, peut être déduite de l'énoncé du théorème sur cet important modèle de géométrie projective.

Proposition 2 ([FF00, p. 27]). *Pour un espace vectoriel V , $\mathcal{P}(V)$ est une géométrie projective si pour tout élément $X, Y, Z \in \mathcal{P}(V)$ on définit : $\ell(X, Y, Z)$ si et seulement si X, Y, Z ont des représentants x, y, z linéairement dépendants.*

3 Isomorphismes

Les isomorphismes seront très utiles tout au long du voyage.

Définition 3 ([FF00, p. 27]). Un *isomorphisme* de géométries projectives est une bijection $g : G_1 \rightarrow G_2$ satisfaisant $\ell_1(a, b, c)$ si et seulement si $\ell_2(ga, gb, gc)$. Si $G_1 = G_2$, alors on dit que g est une *colinéation*.

Toutes les applications linéaires bijectives induisent une colinéation.

Exemple 1. Soit $T : \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}^n$ une application linéaire bijective. L'application $g : \mathcal{P}(\mathbf{R}^n) \rightarrow \mathcal{P}(\mathbf{R}^n)$, $[x] \mapsto [T(x)]$ est une isomorphisme de géométries projectives.

L'application g est bien définie : Soit $x, y \in \mathbf{R}^n$ tel que $[x] = [y]$, i.e. $x = ky$ pour un $k \in \mathbf{R}$. On a :

$$\begin{aligned} [T(x)] &= [T(ky)] && x \text{ définition} \\ &= [kT(y)] && T \text{ linéaire} \\ &= [T(y)] && \text{définition 1.} \end{aligned}$$

D'où, g est bien définie.

Montrons que g est injective. Soit $[x], [y] \in \mathcal{P}(\mathbf{R}^n)$ tel que $[T(x)] = [T(y)]$, i.e. $T(x) = kT(y)$ pour un $k \in \mathbf{R}$. Comme T est linéaire, $T(x) = T(ky)$. De plus, $x = ky$ car T est injective. Par la définition de la classe d'équivalence, on obtient $[x] = [y]$. D'où g est injective. Pour la surjectivité, prenons $[x] \in \mathcal{P}(\mathbf{R}^n)$. Comme T est bijective, T^{-1} existe, et $[T^{-1}(x)] \in \mathcal{P}(\mathbf{R}^n)$. Ainsi $g([T^{-1}(x)]) = [T(T^{-1}(x))] = [x]$. D'où, g est surjective. On a montré que g est bijective.

Vérifions la condition d'isomorphisme. Soit $[x], [y], [z] \in \mathcal{P}(\mathbf{R}^n)$. Supposons que $\ell([x], [y], [z])$. On a des équivalences :

$$\begin{aligned} &\iff ax + by + cz = 0 && \text{proposition 2} \\ &\iff T(ax + by + cz) = 0 && T \text{ linéaire, injective} \\ &\iff aT(x) + bT(y) + cT(z) = 0 && T \text{ linéaire} \\ &\iff \ell([T(x)], [T(y)], [T(z)]) && \text{proposition 2} \end{aligned}$$

Mais les colinéations sont bien plus que des applications linéaires bijectives. En d'autres termes, il existe des collinéations qui ne sont pas induites par une application linéaire.

Exemple 2. L'application $g : \mathcal{P}(\mathbf{R}^2) \rightarrow \mathcal{P}(\mathbf{R}^2)$ définie par $[(x_1, x_2)] \mapsto [((x_1/x_2)^3, 1)]$ si x_2 est non-nul, et $[(x_1, 0)] \mapsto [(x_1, 0)]$ sinon, est une collinéation qui n'est pas induite par une application linéaire.

L'application g est bien définie. Soit x_1, x_2, x'_1, x'_2 des réels; x_2, x'_2 non-nuls, tel que $[(x_1, x_2)] = [(x'_1, x'_2)]$. Alors, $x'_1 = kx_1$ et $x'_2 = kx_2$ pour un k non-nul. On a :

$$\begin{aligned} [((x'_1/x'_2)^3, 1)] &= [((kx_1/kx_2)^3, 1)] \\ &= [(x_1/x_2)^3, 1] \end{aligned}$$

D'où, g est bien définie.

Montrons que g est injective. Soit x_1, x_2, x'_1, x'_2 des réels tel que

$$[((x_1/x_2)^3, 1)] = [((x'_1/x'_2)^3, 1)].$$

On va montrer que $[(x_1, x_2)] = [(x'_1, x'_2)]$. Par la définition de la classe d'équivalence, on a

$$((x_1/x_2)^3, 1) = k((x'_1/x'_2)^3, 1)$$

pour un k non-nul. Alors, $k = 1$ et on a :

$$x_1/x_2 = x'_1/x'_2.$$

Si x_1 est nul, alors x'_1 l'est aussi, et donc on a :

$$\begin{aligned} [(0, x_2)] &= [0, \frac{x'_2}{x_2}x_2] \quad \text{classe d'équivalence définition} \\ &= [0, x_2] \end{aligned}$$

Sinon on a $x_1/x'_1 = x_2/x'_2$ et donc :

$$\begin{aligned} [(x_1, x_2)] &= [(\frac{x'_1x_2}{x'_2}, \frac{x_1x'_2}{x'_1})] \\ &= [(x'_1, x'_2)] \quad \text{classe d'équivalence définition} \end{aligned}$$

Enfin, on vérifie la reste de l'image. Soit x_3 un réel. Il est clair que $[((x_1/x_2)^3, 1)] \neq [(x_3, 0)]$.

D'où, g est injective. Pour la surjectivité, prenons des réels x_1, x_2 . Si x_2 est nul, on a $g([(x_1, 0)]) = [(x_1, 0)]$. Sinon on a :

$$\begin{aligned} g([(x_1^{1/3}, x_2^{1/3})]) &= [((x_1^{1/3}/x_2^{1/3})^3, 1)] \quad g \text{ définition} \\ &= [(x_1/x_2, 1)] \\ &= [(x_1, x_2)] \quad \text{classe d'équivalence définition.} \end{aligned}$$

g est automatiquement une collinéation car trois vecteurs quelconques sont toujours linéairement dépendants dans \mathbf{R}^2 .

Montrons maintenant que g n'est pas induite par une application linéaire. Supposons par l'absurde que g est induite par l'application linéaire $T : \mathbf{R}^2 \rightarrow \mathbf{R}^2$. Alors on a $T(1, 0) = (k_1, 0)$ et $T(0, 1) = (0, k_2)$ pour k_1, k_2 non-nuls. Soit x_1 un réel. D'un part, on a $T(x, 1) = k_x(x^3, 1)$ pour un k_x non-nul, et d'autre part, on a $T(x, 1) = xT(1, 0) + T(0, 1)$. Donc, on a :

$$k_x(x^3, 1) = x(k_1, 0) + (0, k_2)$$

Par conséquent, on obtient l'égalité des polynômes $k_2x^3 = k_1x$ qui entraîne $k_1 = k_2 = 0$. Ceci oblige $T = 0$ qui est absurde.

Chapitre 3

Formalisation

Commençons par transcrire la définition de la géométrie projective (définition 2). Il faut d’abord représenter d’une certaine manière les points, c’est-à-dire les éléments d’une géométrie projective, et la relation de colinéarité. Les points de la géométrie projective seront abstraits, c’est-à-dire un *type*. La relation de colinéarité peut être représentée par une fonction qui prend trois points et renvoie vrai ou faux ; après tout, lorsque l’on dit qu’une relation ℓ est valable, ce que l’on fait, c’est prendre trois points et se demander s’ils sont colinéaires ou non.

```
class HasCollinear (P : Type) where
  ell : P → P → P → Prop
```

```
export HasCollinear (ell)
```

```
variable {Point : Type} [HasCollinear Point]
```

Ici, la flèche entre les types P peut être considérée comme la flèche entre le domaine et le codomaine dans les définitions de fonctions dans le langage habituel des mathématiques, c’est-à-dire le symbole “ \rightarrow ”.

Comme le point reste abstrait, il a fallu dire à Lean que l’existence d’une interprétation de la colinéarité est assurée, c’est-à-dire que la colinéarité des points est quelque chose que l’on peut décider. Dans le code, cela est satisfait par la dernière ligne : `Point` est un type dont la colinéarité existe.

Maintenant, on peut énoncer les axiomes L_1 , L_2 et L_3 dans la définition 2.

```
axiom l1 (a b : Point) : ell a b a
axiom l2 (a b p q : Point) : ell a p q → ell b p q → p ≠ q → ell a b p
axiom l3 (a b c d p : Point) : ell p a b → ell p c d →
  ∃ q : Point, ell q a c ∧ ell q b d
```

Il y a quelques points à noter ici. Tout d’abord, les flèches utilisées ici sont différentes de celles que nous avons utilisées ci-dessus, même si elles sont représentées par le même caractère typographique : Il s’agit de flèches d’implication, pour lesquelles nous utilisons normalement le symbole “ \implies ”. Deuxièmement, les conditions des axiomes qui contiennent des conjonctions logiques sont converties en implications sérielles. Expliquons cette équivalence logique. Supposons qu’on a une condition de la forme $(p \wedge q) \implies r$. On a des équivalences

suivantes :

$$\begin{aligned}
 &\iff \neg(p \wedge q) \vee r \\
 &\iff (\neg p \vee \neg q) \vee r \\
 &\iff \neg p \vee (\neg q \vee r) \\
 &\iff p \implies (\neg q \vee r) \\
 &\iff p \implies (q \implies r)
 \end{aligned}$$

Grâce à ces axiomes, nous pouvons prouver la proposition suivante.

Proposition 3. *Toute relation ternaire ℓ qui satisfait les deux axiomes L_1 et L_2 est symétrique.*

Dans la preuve, on va dériver la colinéarité de toutes les permutations possibles de trois points a, b, c à partir de $\ell(a, b, c)$. Ici, on ne donnera que $\ell(a, c, b)$ et les cinq autres versions seront omises.

```

theorem acb (a b c : Point) : ell a b c → ell a c b := by
intro acb_col -- Supposons que  $\ell(a, b, c)$ .
obtain rfl | bc_neq := eq_or_ne b c -- Si  $b = c$ ,
exact acb_col -- le résultat est trivial,
apply 12 a c b c -- sinon on applique  $L_2$ ;
exact acb_col -- première condition de  $L_2$ 
apply 11 c b -- deuxième condition de  $L_2$ 
exact bc_neq -- troisième condition de  $L_2$ .

```

Ce code est la transcription exacte de la phrase “Si $b = c$, le résultat est trivial, et sinon on applique L_2 à $\ell(a, b, c)$ et $\ell(c, b, c)$ ”.

1 Regrouper le point et les axiomes

Cette proposition la plus simple peut être considérée comme un premier théorème prouvé avec cette configuration. Des théorèmes plus ambitieux peuvent également être prouvés, mais décrire une géométrie projective en déclarant son point et axiomes les uns après les autres n’est pas la manière la plus élégante. Pour l’instant, ils n’ont qu’une relation sérielle dans le fichier. Ce qui est plus utile, c’est une structure qui contiendrait toutes les informations nécessaires à une géométrie projective. La structure suivante répond à ce besoin :

```

class ProjectiveGeometry (point : Type u) where
ell : point → point → point → Prop
11 : ∀ a b, ell a b a
12 : ∀ a b p q, ell a p q → ell b p q → p ≠ q → ell a b p
13 : ∀ a b c d p, ell p a b → ell p c d → ∃ q : point, ell q a c ∧ ell q b d

```

De cette manière, on a regroupé la relation de colinéarité et les axiomes (“bundling”), et le point est resté dégroupé (“unbundled”) parce qu’il s’agit d’un paramètre et que l’on veut que différents types de points correspondent à différentes géométries projectives. Pour mieux expliquer le contraste, on ne veut pas que des relations de colinéarité différentes correspondent à des géométries projectives différentes; on pense à une relation de colinéarité canonique pour obtenir une géométrie projective. Ceci est expliqué en détail [ici](#).

2 Instances

Il est maintenant possible de déclarer que la projectivisation d'un espace vectoriel est une géométrie projective.

```
instance : ProjectiveGeometry (P K V) :=
<
fun X Y Z => ¬ Independent ![X, Y, Z],
sorry,
sorry,
sorry
>
```

Expliquons comment cela fonctionne : Tout d'abord, une relation de colinéarité sera fournie. Celle-ci est déjà établie mathématiquement dans la proposition 2. La fonction `Independent` provient de `mathlib4`. Elle prend trois points de la projectivisation et affirme que leurs représentants sont linéairement dépendants. Sur le plan technique, il prend une famille de points de projectivisation. Une famille est une fonction d'indices dans des points. Heureusement, Lean dispose d'une syntaxe pour convertir une liste en une telle fonction : “!”. Si elle n'existait pas, on devrait l'écrire manuellement :

```
def indexer_generator (X Y Z : P K V) : Fin 3 → P K V :=
fun i : Fin 3 => match i with
| 0 => X
| 1 => Y
| 2 => Z
```

Ensuite, les axiomes seront vérifiés. Lean remplacera la relation de colinéarité dans les axiomes pour nous. Les “sorry” servent de substitut à des preuves qui n'ont pas encore été écrites.

Ainsi, nous pouvons continuer à étudier le côté purement synthétique et nos résultats s'appliqueront automatiquement à la projectivisation d'un espace vectoriel : Le côté concret. Pour les choses qui sont spécifiques aux projectivisations, nous pouvons bien sûr passer du côté concret et continuer à développer des propriétés pour elles.

Références

- [FF00] C.A. FAURE et A. FRÖLICHER. *Modern Projective Geometry*. T. 521. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 2000.