

DÉMONSTRATIONS

Objektyp: **Chapter**

Zeitschrift: **L'Enseignement Mathématique**

Band (Jahr): **44 (1998)**

Heft 3-4: **L'ENSEIGNEMENT MATHÉMATIQUE**

PDF erstellt am: **21.07.2024**

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Si l'on retire la condition d'uniformité de la définition d'un homéomorphisme simple, la dynamique peut devenir beaucoup plus complexe. Nous montrerons :

THÉORÈME 2. *Soit v un point de C . Il existe une infinité non dénombrable d'homéomorphismes $f: C \rightarrow C$, deux à deux non conjugués, tels que*

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} f^n(x) = \lim_{n \rightarrow +\infty} f^{-n}(x) = v$$

pour tout $x \in C$.

DÉMONSTRATIONS

Rappelons que l'ensemble de Cantor C est caractérisé à homéomorphisme près comme étant compact, métrisable, parfait, totalement discontinu (voir par exemple [5]). En particulier toute partie non vide, ouverte et fermée de C est homéomorphe à C . Tout point de C possède un système fondamental de voisinages ouverts et fermés. Si X est localement compact mais pas compact, on notera $\widehat{X} = X \cup \{\text{point}\}$ son compactifié d'Alexandrov.

Soit $f: C \rightarrow C$ un homéomorphisme simple. La fonction $f^\infty = \lim_{n \rightarrow +\infty} f^n$ existe, et est continue sur $C \setminus F$. Elle prend bien sûr ses valeurs dans F . Montrons que f^{-1} est simple. Soit K un compact de $C \setminus F$. Soit V un voisinage ouvert de F , disjoint de K . Pour n grand on a $f^n(C \setminus V) \subset V$, d'où $C \setminus V \subset f^{-n}(V)$ et $f^{-n}(C \setminus V) \subset V$. On en déduit $f^{-n}(K) \subset f^{-n}(C \setminus V) \subset V$. Donc f^{-n} converge uniformément sur K , et f^{-1} est simple.

En considérant f^∞ et $f^{-\infty}$, on associe alors à f un graphe Γ comme indiqué dans l'introduction. Il possède évidemment les propriétés (1) et (2) du théorème 1. La propriété (3) sera établie un peu plus tard.

DÉMONSTRATION DU THÉORÈME 1

Elle se décompose en deux parties : surjectivité et injectivité.

Surjectivité. Étant donné un graphe Γ possédant les trois propriétés mentionnées dans le théorème, nous allons construire un homéomorphisme simple f_0 tel que $\Gamma(f_0)$ soit isomorphe à Γ . Nous commençons par trois cas élémentaires.

1. Si Γ est une boucle (un seul sommet, une seule arête), considérons le décalage $\sigma: (k, n) \mapsto (k, n+1)$ sur $X = K \times \mathbf{Z}$, où K est un ensemble de

Cantor. La caractérisation rappelée ci-dessus assure que \widehat{X} est un ensemble de Cantor. Le prolongement f_0 de σ à \widehat{X} est simple, et $\Gamma(f_0) = \Gamma$.

2. Si Γ est un segment (une seule arête, à extrémités distinctes), on considère encore le décalage sur $X = K \times \mathbf{Z}$, mais on compactifie X en lui ajoutant deux points à l'infini, avec comme systèmes fondamentaux de voisinages $K \times [n, +\infty[$ et $K \times]-\infty, -n]$ respectivement.

3. Si Γ se compose d'un sommet et de deux boucles attachées à ce sommet, on considère le compactifié d'Alexandrov de $(K \setminus \{\text{point}\}) \times \mathbf{Z}$ muni du décalage.

Le cas général s'obtient en combinant ces trois modèles. On part d'un nombre fini de points, identifiés aux sommets de Γ . Pour chaque arête orientée $v_1 v_2$, avec $v_1 \neq v_2$, on attache un modèle de type 2 en identifiant la source avec v_1 et le puits avec v_2 . A chaque sommet v on attache un modèle de type 1 (resp. 3) s'il y a dans Γ une (resp. deux) boucles en v , en identifiant l'unique point fixe avec v . La propriété (3) du théorème 1 garantit que l'on obtient un espace de Cantor. Celui-ci est muni d'un homéomorphisme simple f_0 vérifiant $\Gamma(f_0) = \Gamma$.

Injectivité. Soit f un homéomorphisme simple. Pour $v \in F$, soit

$$A(v) = \{x \notin F \mid f^{-\infty}(x) = f^{\infty}(x) = v\}.$$

Pour $v_1 \neq v_2$, soit

$$A(v_1, v_2) = \{x \notin F \mid f^{-\infty}(x) = v_1, f^{\infty}(x) = v_2\}.$$

Les $A(v)$ et $A(v_1, v_2)$ qui ne sont pas vides forment une partition de $C \setminus F$ en sous-espaces f -invariants ouverts et fermés, dont nous déterminons maintenant l'adhérence dans C .

LEMME. Si $A(v) \neq \emptyset$, on a $\overline{A(v)} = A(v) \cup \{v\}$. De même, si $A(v_1, v_2) \neq \emptyset$, on a $\overline{A(v_1, v_2)} = A(v_1, v_2) \cup \{v_1, v_2\}$.

Démonstration. Soit V un voisinage ouvert et fermé de v tel que $V \cap F = \{v\}$, et $W = \{x \in V \mid x \notin f(V)\}$. Toute orbite de $A(v)$ non entièrement contenue dans V rencontre W . La convergence de $f^{\pm n}$ vers $f^{\pm \infty}$ étant uniforme sur le compact W , il existe un entier N tel que

$$A(v) \subset V \cup \bigcup_{|n| \leq N} f^n(W).$$

On en déduit $\overline{A(v)} = A(v) \cup \{v\}$. La démonstration pour $A(v_1, v_2)$ est analogue, en considérant un voisinage de $\{v_1, v_2\}$ ne contenant pas d'autre point de F . \square

Il résulte de ce lemme que $\Gamma(f)$ possède la propriété (3) du théorème 1. En effet, un $w \in F$ n'appartenant à aucune arête n'appartiendrait à aucun $\overline{A(v)}$ ou $\overline{A(v_1, v_2)}$. C'est impossible puisque l'union des adhérences des $A(v)$ et des $A(v_1, v_2)$ est C tout entier.

Nous allons maintenant terminer la preuve du théorème 1 en montrant que, étant donné Γ , tout homéomorphisme simple f tel que $\Gamma(f)$ soit isomorphe à Γ est topologiquement conjugué au f_0 construit plus haut.

Le lemme permet de supposer que f_0 est l'un des trois modèles ci-dessus, la conjugaison cherchée pouvant être définie séparément sur chaque $\overline{A(v)}$ ou $\overline{A(v_1, v_2)}$.

Commençons par le cas où Γ est un segment. Appelons v_1 la source de f , et v_2 le puits. Soit V un voisinage ouvert et fermé de v_2 ne contenant pas v_1 . Nous affirmons que l'ouvert $U = \bigcup_{n \geq 0} f^n(V)$ est aussi fermé. En effet, si $W = \{x \in f(V) \mid x \notin V\}$, on a

$$U = V \cup \bigcup_{n=0}^{\infty} f^n(W),$$

et cette union est finie car f^n converge vers v_2 uniformément sur W .

Soit alors \mathcal{K} le compact $U \setminus f(U)$. Il rencontre chaque orbite de $C \setminus F$ exactement une fois. Soit ρ un homéomorphisme de \mathcal{K} sur le compact K utilisé pour construire f_0 . On le prolonge en un homéomorphisme de $C \setminus F$ sur $K \times \mathbf{Z}$ en posant $\rho(f^n(k)) = (k, n)$ pour $k \in \mathcal{K}$, et il s'étend à C en une conjugaison de f à f_0 .

Supposons maintenant que Γ a un seul sommet. Soit v l'unique point fixe de f . Notons que, pour tout voisinage ouvert V de v , les intersections avec $C \setminus V$ de $\bigcap_{n=1}^{\infty} f^n(V)$ et $\bigcap_{n=1}^{\infty} f^{-n}(V)$ sont des ouverts. En effet, si $Y \subset C \setminus V$ est un voisinage compact d'un point $x \neq v$, on a pour n assez grand $f^{-n}(Y) \subset V$ et $f^n(Y) \subset V$, et donc aussi $Y \subset f^n(V)$ et $Y \subset f^{-n}(V)$.

On suppose d'abord que Γ est une seule boucle, c'est-à-dire qu'il existe un voisinage V de v ne contenant aucune orbite autre que $\{v\}$ en totalité. On choisit V ouvert et fermé, et on considère

$$\mathcal{K} = (C \setminus V) \cap \bigcap_{n=1}^{\infty} f^n(V).$$

Il est fermé, ouvert, et rencontre toute orbite autre que $\{v\}$ exactement une fois. Comme précédemment, tout homéomorphisme de \mathcal{K} avec K s'étend en une conjugaison de f avec le f_0 du modèle 1.

Supposons enfin que f a un unique point fixe v et qu'il existe des orbites arbitrairement proches de v . Soit $V_0 \supset V_1 \supset \dots \supset V_p \supset \dots$ un système

fondamental de voisinages ouverts et fermés de v , avec $V_0 = C$. Posons

$$Q_p = (V_p \setminus V_{p+1}) \cap \bigcap_{n=1}^{\infty} f^n(V_{p+1}) \cap \bigcap_{n=1}^{\infty} f^{-n}(V_p)$$

pour $p \geq 0$, et $Q = \cup Q_p$. Chaque Q_p étant ouvert, fermé, et contenu dans V_p , l'ensemble Q est ouvert, et son adhérence est $Q \cup \{v\}$. En particulier, Q est homéomorphe à un ensemble de Cantor privé d'un point. De plus Q rencontre chaque orbite autre que $\{v\}$ en exactement un point (si $x \neq v$, son orbite rencontre Q_p , où p est le plus grand entier tel que l'orbite soit contenue dans V_p). Tout homéomorphisme de Q sur $K \setminus \{\text{point}\}$ s'étend alors en une conjugaison de f avec le f_0 du modèle 3. \square

DÉMONSTRATION DU COROLLAIRE

Seule la première assertion demande une démonstration. Soit A un ensemble à n éléments. Il y a $p_n = 3^n 2^{n(n-1)}$ manières d'attacher des arêtes orientées aux éléments de A de façon que le graphe obtenu vérifie les conditions (1) et (2) du théorème 1. Presque tous ces graphes vérifient également la condition (3): le nombre de ceux qui ne la vérifient pas est majoré par np_{n-1} , qui est un $o(p_n)$. Pour estimer $N(n)$ nous devons compter les graphes à isomorphisme près, c'est à dire en faisant agir le groupe symétrique. Puisque $\log p_n \sim n^2 \log 2$ et $\log n! = o(n^2)$, on a bien $\log N(n) \sim n^2 \log 2$. \square

DÉMONSTRATION DU THÉORÈME 2

Soit K un ensemble de Cantor, et $L = \widehat{K \times \mathbf{N}}$. Nous distinguons dans L le point à l'infini, noté ∞ , et $L_0 = K \times \{0\}$. Soit σ le prolongement à L du décalage $(k, n) \mapsto (k, n+1)$, et σ^{-1} son inverse, défini sur $L \setminus L_0$.

Considérons maintenant $M = L \times \{-1, 1\} \times \mathbf{N}$. Notons $\widehat{M} = M \cup \{v\}$ son compactifié d'Alexandrov, $M^- = L \times \{-1\} \times \{0\}$, et $M^+ = L \times \{1\} \times \{0\}$. Nous définissons un homéomorphisme φ de $\widehat{M} \setminus M^+$ sur $\widehat{M} \setminus M^-$ par:

$$\begin{cases} \varphi(\ell, -1, n) = (\sigma^{-1}(\ell), -1, n+1) & \text{pour } \ell \in L \setminus L_0 \\ \varphi(\ell, -1, n) = (\ell, 1, n) & \text{pour } \ell \in L_0 \\ \varphi(\ell, 1, n) = (\sigma(\ell), 1, n-1) & \text{pour } n > 0 \\ \varphi(v) = v. \end{cases}$$

La dynamique de φ est analogue à celle d'un champ de vecteurs du plan dans un secteur d'une selle. Le point v est fixe. L'orbite positive de $(\infty, -1, 0)$ tend vers v , de même que l'orbite négative de $(\infty, 1, 0)$. Si $\ell \neq \infty$, l'orbite

d'un point $(\ell, -1, 0) \in M^-$ aboutit à M^+ , après un nombre d'itérations qui tend vers l'infini quand $\ell \rightarrow \infty$ dans L .

Soit maintenant $q \geq 1$ un entier. Soit P l'union disjointe de q exemplaires $\widehat{M}_1, \dots, \widehat{M}_q$ de \widehat{M} , et de deux exemplaires L^-, L^+ de $\widehat{L} \times \mathbf{N}$. Notons que les sous-espaces M_i^-, M_i^+ de \widehat{M}_i , ainsi que $L \times \{0\} \subset L^-$ et $L \times \{0\} \subset L^+$, sont des exemplaires de L . Il existe donc des homéomorphismes canoniques entre ces espaces.

Nous définissons un homéomorphisme θ sur P de la manière suivante. Sur chaque exemplaire \widehat{M}_i , il est égal à φ en dehors de M_i^+ . Sur M_i^+ , pour $i < q$, il coïncide avec l'homéomorphisme naturel de M_i^+ sur M_{i+1}^- , et sur M_q^+ c'est l'homéomorphisme de M_q^+ avec $L \times \{0\} \subset L^+$. On définit θ sur L^+ comme le prolongement du décalage $(\ell, n) \mapsto (\ell, n + 1)$ de $L \times \mathbf{N}$, sur $L^- \setminus (L \times \{0\})$ comme le prolongement de l'inverse du décalage, et enfin sur $L \times \{0\} \subset L^-$ comme l'homéomorphisme naturel de $L \times \{0\}$ avec M_1^- .

Les points fixes de θ sont une source v^- (le point à l'infini de L^-), un puits v^+ (le point à l'infini de L^+), et q "selles" v_1, \dots, v_q (une dans chaque \widehat{M}_i). Toutes les orbites infinies de θ vont de v^- à v^+ , sauf $q + 1$ orbites "singulières" qui vont respectivement de v^- à v_1 , de v_i à v_{i+1} ($1 \leq i \leq q - 1$), et de v_q à v^+ .

Ces $q + 1$ orbites sont mutuellement contiguës, au sens suivant: nous disons que les orbites de deux points x, y sont *contiguës* s'il existe une suite $x_p \rightarrow x$, et des entiers n_p , avec $\theta^{n_p}(x_p) \rightarrow y$. Les autres orbites infinies de θ ne sont contiguës qu'à elles-mêmes. Les orbites singulières de θ sont en fait les points de non-séparation de l'espace des orbites infinies de θ .

Identifiant entre eux les $q + 2$ points fixes de θ , nous obtenons pour chaque $q \geq 1$ un homéomorphisme f_q d'un ensemble de Cantor, possédant un unique point fixe v et vérifiant les conditions du théorème 2. Ces homéomorphismes ne sont pas conjugués entre eux: ils sont distingués par la contiguïté.

Pour obtenir une infinité non dénombrable, nous combinons les f_q . Soit Q une partie non vide de \mathbf{N} , avec $0 \notin Q$. Pour chaque $q \in Q$, soit C_q un ensemble de Cantor muni de l'homéomorphisme f_q . Notons c_q le point fixe de f_q . Considérons, sur le compactifié d'Alexandrov de l'union disjointe des $C_q \setminus \{c_q\}$, l'homéomorphisme f_Q qui coïncide avec f_q sur chaque $C_q \setminus \{c_q\}$. Il vérifie les conditions du théorème 2. Sur l'ensemble des orbites infinies de f_Q , la contiguïté est une relation d'équivalence. Il y a une classe d'équivalence à $q + 1$ éléments pour chaque $q \in Q$, et les autres classes ont un seul élément. Donc f_Q n'est pas conjugué à $f_{Q'}$ si $Q \neq Q'$. \square