

Zeitschrift: L'Enseignement Mathématique
Herausgeber: Commission Internationale de l'Enseignement Mathématique
Band: 24 (1978)
Heft: 1-2: L'ENSEIGNEMENT MATHÉMATIQUE

Artikel: SOLUTIONS PRESQUE-PÉRIODIQUES DES ÉQUATIONS DIFFÉRENTIELLES ABSTRAITES
Autor: Zaidman, S.
Kapitel: §3. Presque-périodicité des solutions a trajectoire relativement compacte
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-49693>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 19.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

le résultat classique de Bochner cité dans l'introduction ¹⁾, pour déduire que chaque fonction $u_j(t)$ est presque-périodique dans H_j , et par conséquent, dans H aussi.

Maintenant, pour tout $h \in H$, on a $h = \sum_{j=1}^{\infty} P_j h$, et donc, pour tout $t \in \mathbf{R}$, on a que

$$u(t) = \sum_{j=1}^{\infty} P_j u(t) = \sum_{j=1}^{\infty} u_j(t).$$

Considérons aussi la série

$$\sum_{j=1}^{\infty} P_j Au(t) = \sum_{j=1}^{\infty} Au_j(t) = Au(t).$$

Rappelons enfin le fait élémentaire suivant:

dans la série d'opérateurs $\sum_{j=1}^{\infty} P_j = I$ qui converge fortement (c'est-à-dire

que $\sum_{j=1}^{\infty} P_j x = x$, pour tout $x \in H$), la convergence est uniforme quand x varie dans tout ensemble relativement compact de H .

Vu que $u(t)$ est fonction bornée dans H , il résulte que l'ensemble $\{Au(t)\}_{-\infty < t < \infty}$ est relativement compact dans H , et par conséquent la série $\sum_{j=1}^{\infty} P_j Au(t)$ est uniformément convergente pour $t \in \mathbf{R}$.

Chaque fonction $Au_j(t)$ étant manifestement presque-périodique, il s'ensuit que $Au(t)$ est presque-périodique aussi. Par suite, la dérivée $u'(t) = Au(t) + f(t)$ est presque-périodique, et puisque H est un espace parfait ²⁾, et $u(t)$ est bornée, le théorème en résulte.

§ 3. PRESQUE-PÉRIODICITÉ DES SOLUTIONS A TRAJECTOIRE RELATIVEMENT COMPACTE

Nous allons étudier maintenant des solutions presque-périodiques pour des équations

$$(3.1) \quad u'(t) = Au(t) + f(t).$$

A étant maintenant un opérateur linéaire de domaine $\mathcal{D}(A)$ dense, mais non nécessairement continu.

¹⁾ Précisément le Th. 4.2 (pag. 92) dans [5].

²⁾ Théorème de L. Amerio (voir par ex. [1] et [12]).

Le premier résultat, assez simple, et bien connu (voir [1] et [3]), concerne l'équation homogène. Précisément on a le

THÉORÈME 3.1. *Soit A un opérateur linéaire de domaine dense $\mathcal{D}(A)$ dans l'espace de Hilbert H , tel que $(Ah, k)_H = -(h, Ak)_H$, pour tout $h, k \in \mathcal{D}(A)$. Soit $u(t)$ une fonction continûment différentiable de \mathbf{R} dans H , à valeurs dans $\mathcal{D}(A)$, telle que $u'(t) = Au(t)$, $t \in \mathbf{R}$. Supposons que l'ensemble $\{u(t)\}_{t \in \mathbf{R}}$ est relativement compact dans H . Alors $u(t)$ est presque-périodique dans H .*

Démonstration. Soit $v(t)$ une solution arbitraire de l'équation $v'(t) = Av(t)$; soit $\phi(t)$ la fonction à valeurs réelles

$$\phi(t) = \|v(t)\|_H^2 = (v(t), v(t))_H;$$

$\phi(t)$ est donc continûment différentiable et l'on a

$$\begin{aligned} \phi'(t) &= (v'(t), v(t))_H + (v(t), v'(t))_H \\ &= (Av(t), v(t))_H + (v(t), Av(t))_H = 0 \end{aligned}$$

vu que A est antisymétrique. Il résulte donc $\phi(t) = \phi(0)$, c'est-à-dire $\|v(t)\|_H^2 = \|v(0)\|_H^2$, $t \in \mathbf{R}$.

Prenons maintenant, pour tout nombre réel σ , la fonction translatée $v_\sigma(t) = u(t + \sigma)$; on a $v'_\sigma(t) = Av_\sigma(t)$; pour σ_1, σ_2 arbitraires on trouve que

$$(v_{\sigma_1}(t) - v_{\sigma_2}(t))' = A(v_{\sigma_1}(t) - v_{\sigma_2}(t)),$$

et donc

$$\|v_{\sigma_1}(t) - v_{\sigma_2}(t)\|_H^2 = \|v_{\sigma_1}(0) - v_{\sigma_2}(0)\|_H^2, \quad t \in \mathbf{R},$$

ce qui revient à l'égalité

$$\|u(t + \sigma_1) - u(t + \sigma_2)\|_H^2 = \|u(\sigma_1) - u(\sigma_2)\|_H^2, \quad t \in \mathbf{R}.$$

Si maintenant $(\sigma_n)_1^\infty$ est une suite arbitraire de réels, on peut en extraire une sous-suite $(\sigma_{n_p})_1^\infty$, de façon que la suite $\{u(\sigma_{n_p})\}_{p=1}^\infty$ soit de Cauchy dans H . Mais alors,

$$\sup_{t \in \mathbf{R}} \|u(t + \sigma_{n_p}) - u(t + \sigma_{n_q})\|_H^2 = \|u(\sigma_{n_p}) - u(\sigma_{n_q})\|_H^2$$

et par conséquent la suite de translatées $\{u(t + \sigma_{n_p})\}_{p=1}^\infty$, est une suite de Cauchy par rapport à la convergence uniforme sur \mathbf{R} . Cela démontre la presque-périodicité de $u(t)$, d'après le critère de Bochner.

Le deuxième résultat ici concerne l'équation non-homogène, $u'(t) = Au(t) + f(t)$, dans un espace de Banach arbitraire \mathcal{X} . Par hypothèse, A sera maintenant un opérateur linéaire, fermé, de domaine dense $\mathcal{D}(A)$ dans \mathcal{X} , qui est le générateur infinitésimal d'un groupe $G(t)$ de transformations linéaires continues de \mathcal{X} en lui-même. Pour être plus précis, on suppose que $G(t)$ est une fonction de \mathbf{R} dans $\mathcal{L}(\mathcal{X}, \mathcal{X})$ ¹⁾, telle que $G(t)x$ est continue pour tout $x \in \mathcal{X}$; $G(0)$ sera l'opérateur identité dans \mathcal{X} , et on aura $G(t_1 + t_2) = G(t_1)G(t_2)$ pour toute paire de nombres réels t_1 et t_2 . On suppose aussi que la relation

$$\lim_{\eta \rightarrow 0} \frac{G(\eta)x - x}{\eta} = Ax$$

a lieu si et seulement si $x \in \mathcal{D}(A)$. Nous allons démontrer le résultat suivant (voir [10]):

THÉORÈME 3.2. *Soit $f(t)$ une fonction continue presque-périodique de $t \in \mathbf{R}$ à valeurs dans \mathcal{X} . Soit $u(t)$ une fonction de \mathbf{R} dans $\mathcal{D}(A)$, continûment différentiable dans \mathcal{X} , vérifiant la relation :*

$$u'(t) = Au(t) + f(t), \quad t \in \mathbf{R}.$$

Supposons aussi que l'ensemble $\{u(t)\}_{t \in \mathbf{R}}$ soit relativement compact dans \mathcal{X} , et que la fonction $G(t)x$ soit presque-périodique de \mathbf{R} dans \mathcal{X} , pour tout $x \in \mathcal{X}$. Alors $u(t)$ est aussi presque-périodique.

Le théorème sera une conséquence de certains lemmes de caractère élémentaire. Premièrement, un résultat de représentation des solutions moyennant une formule intégrale:

LEMME 1. *Si $f(t)$ est continue de \mathbf{R} dans \mathcal{X} , et si $u(t)$ est une solution de l'équation $u'(t) = Au(t) + f(t)$, on a*

$$u(t) = G(t)u(0) + \int_0^t G(t-\sigma)f(\sigma) d\sigma \quad \text{pour tout } t \in \mathbf{R}.$$

On considère en effet la relation $u'(\sigma) = Au(\sigma) + f(\sigma)$, $\sigma \in \mathbf{R}$, et on applique des deux côtés l'opérateur $G(t-\sigma)$, où t est fixé. En intégrant de 0 à t , on déduit

$$\int_0^t G(t-\sigma)u'(\sigma) d\sigma = \int_0^t G(t-\sigma)Au(\sigma) d\sigma + \int_0^t G(t-\sigma)f(\sigma) d\sigma.$$

¹⁾ Espace des opérateurs linéaires continus de x en x .

D'un autre côté, ce n'est pas difficile à voir que $\frac{d}{d\sigma} G(t-\sigma) u(\sigma) = -AG(t-\sigma)u(\sigma) + G(t-\sigma)u'(\sigma)$; en intégrant ici de 0 à t on trouve que

$$u(t) - G(t)u(0) = - \int_0^t AG(t-\sigma)u(\sigma) d\sigma + \int_0^t G(t-\sigma)u'(\sigma) d\sigma$$

et en additionnant on voit, par la commutativité de $G(t-\sigma)$ avec A , l'égalité

$$u(t) - G(t)u(0) = \int_0^t G(t-\sigma)f(\sigma) d\sigma, t \in \mathbf{R}.$$

Pour intégrer on utilise le fait immédiat que $G(\xi)h(\xi)$ est continue de \mathbf{R} dans \mathcal{X} , pour toute fonction continue $h(\xi)$ de \mathbf{R} dans \mathcal{X} . On a aussi un résultat de compacité exprimé dans le lemme suivant.

LEMME 2. Soit $G(t)$ un groupe à un paramètre fortement continu, ayant la propriété que l'ensemble $\{G(t)x\}_{t \in \mathbf{R}}$ est relativement compact dans \mathcal{X} , pour tout $x \in \mathcal{X}$. Supposons aussi que $f(t)$ soit une fonction de \mathbf{R} dans \mathcal{X} , telle que l'ensemble $\{f(t)\}_{t \in \mathbf{R}}$ soit relativement compact dans \mathcal{X} .

Alors, l'ensemble $\{G(t)f(t)\}_{t \in \mathbf{R}}$ est relativement compact dans \mathcal{X} .

En effet, on remarque premièrement que $\sup \|G(t)\|_{\mathcal{L}(\mathcal{X}, \mathcal{X})} = M < \infty$ d'après le théorème sur la borne uniforme, et vu que tout ensemble relativement compact est borné.

Prenons alors une suite arbitraire $\{t_n\}_1^\infty$ de réels et extrayons une sous-suite $\{t'_n\}_1^\infty$ telle que $\lim_{n \rightarrow \infty} f(t'_n) = \omega \in \mathcal{X}$. Après une seconde extraction,

on trouve une sous-suite $\{t''_n\}_1^\infty \subset \{t'_n\}_1^\infty$ telle que la suite $\{G(t''_n)\omega\}_0^\infty$ est aussi de Cauchy. On en déduit alors que la suite $\{G(t''_n)f(t''_n)\}_{n=1}^\infty$ est de Cauchy dans \mathcal{X} , en observant l'égalité

$$G(t''_n)f(t''_n) - G(t''_m)f(t''_m) = [G(t''_n) - G(t''_m)][f(t''_n) - \omega] + [G(t''_n) - G(t''_m)]\omega + G(t''_m)[f(t''_n) - f(t''_m)],$$

et donc la majoration

$$\|G(t''_n)f(t''_n) - G(t''_m)f(t''_m)\| \leq 2M \|f(t''_n) - \omega\| + \|[G(t''_n) - G(t''_m)]\omega\| + M \|f(t''_n) - f(t''_m)\|.$$

On passe ensuite à un résultat de presque-périodicité, exprimé dans le

LEMME 3. Soit $G(t)$ un groupe à un paramètre fortement continu, tel que la fonction $G(t)x$ soit presque-périodique pour tout $x \in \mathcal{X}$. Soit

$f(t)$ une fonction presque-périodique dans \mathcal{X} . Alors la fonction $G(t)f(t)$ est aussi presque-périodique.

Pour prouver ce Lemme, remarquons que l'ensemble $\{f(t)\}_{t \in \mathbf{R}}$ est relativement compact dans \mathcal{X} , ce qui arrive pour toute fonction presque-périodique ¹⁾. Il existe alors, pour tout $\varepsilon > 0$, des éléments $f(t_1), f(t_2), \dots, f(t_\nu)$, de façon que, pour tout t réel, on ait la relation

$$f(t) \in \bigcup_{k=1}^{\nu} \mathfrak{S}(f(t_k), \varepsilon) \text{ où } \mathfrak{S}(y_0, \varepsilon) = \{x \in X, \|x - y_0\| < \varepsilon\}.$$

Prenons maintenant en considération les fonctions presque-périodiques (en nombre fini)

$$f(t), G(t)f(t_1), G(t)f(t_2), \dots, G(t)f(t_\nu)$$

d'après résultats connus ²⁾, il existe un ensemble relativement dense $\{\tau\}_\varepsilon$ commun pour ces fonctions, formé de ε -presque-périodes. De plus, comme dans le Lemme 2, on a $\sup_{t \in \mathbf{R}} \|G(t)\|_{\mathcal{L}(X, X)} = M < \infty$. En prenant arbitrairement $\bar{t} \in \mathbf{R}$, on trouve un t_k , tel que $\|f(\bar{t}) - f(t_k)\| < \varepsilon$. On déduit ensuite, pour $\tau \in \{\tau\}_\varepsilon$, la relation

$$\begin{aligned} & G(\bar{t} + \tau)f(\bar{t} + \tau) - G(\bar{t})f(\bar{t}) \\ &= G(\bar{t} + \tau)[f(\bar{t} + \tau) - f(\bar{t})] + G(\bar{t} + \tau)[f(\bar{t}) - f(t_k)] \\ &+ G(\bar{t} + \tau)f(t_k) - G(\bar{t})f(t_k) + G(\bar{t})[f(t_k) - f(\bar{t})] \end{aligned}$$

et donc la majoration

$$\|G(\bar{t} + \tau)f(\bar{t} + \tau) - G(\bar{t})f(\bar{t})\| \leq M\varepsilon + M\varepsilon + \varepsilon + M\varepsilon = 3M\varepsilon + \varepsilon.$$

ce qui prouve le Lemme, \bar{t} étant un réel arbitraire.

LEMME 4. Si $h(t)$ est une fonction presque périodique de \mathbf{R} dans \mathcal{X} , alors $\check{h}(t) = h(-t)$ est aussi une fonction presque-périodique.

En effet, si τ est une ε -presque-période de $h(t)$, alors $-\tau$ est une ε -presque-période de $\check{h}(t)$, vu que

$$\check{h}(t - \tau) - \check{h}(t) = h(-t + \tau) - h(-t)$$

¹⁾ Voir [1], IV — pag. 5.

²⁾ Voir [1], pag. 10.

et

$$\sup_{t \in \mathbb{R}} \|\check{h}(t-\tau) - \check{h}(t)\| = \sup_{t \in \mathbb{R}} \|h(-t+\tau) - h(-t)\| < \varepsilon$$

En plus, si $\{\tau\}_\varepsilon$ est un ensemble relativement dense de nombres réels, l'ensemble $\{-\tau\}_\varepsilon$ est aussi relativement dense.

Par conséquent, si le groupe d'opérateurs $G(t)$ est tel que $G(t)x$ est presque-périodique pour tout $x \in \mathcal{X}$, alors le groupe $\check{G}(t) = G(-t)$ vérifie la même propriété.

On peut donc maintenant donner la

Démonstration du Théorème 3.2. En vue du Lemme 1 et de la presque-périodicité de la fonction $G(t)u(o)$, il nous reste à prouver que la fonction

$v(t) = \int_0^t G(t-\sigma)f(\sigma) d\sigma$ est presque-périodique. On voit immédiatement que l'ensemble $\{v(t)\}_{t \in \mathbb{R}}$ est relativement compact dans \mathcal{X} , vu que chaque élément de cet ensemble s'écrit sous la forme $v(t) = u(t) - G(t)u(0)$, les deux ensembles $\{u(t)\}_{t \in \mathbb{R}}$ et $\{G(t)u(0)\}_{t \in \mathbb{R}}$ étant aussi relativement compacts.

On a aussi

$$v(t) = G(t) \int_0^t G(-\sigma)f(\sigma) d\sigma$$

et donc

$$G(-t)v(t) = \int_0^t G(-\sigma)f(\sigma) d\sigma.$$

Maintenant, l'ensemble $\{G(-t)v(t)\}_{t \in \mathbb{R}}$ est relativement compact, d'après le Lemme 2 et le Lemme 4.

D'autre part, la fonction $G(-\sigma)f(\sigma)$ est presque-périodique (d'après les Lemmes 3 et 4); vu que l'ensemble $\left\{ \int_0^t G(-\sigma)f(\sigma) d\sigma \right\}_{t \in \mathbb{R}}$ est relativement compact dans \mathcal{X} , on déduit, par un théorème de Bochner [2] (voir aussi [1], I — pag. 53, 57, 58, 59, et [5], Th. 6.19, pag. 161) la presque-périodicité de $\int_0^t G(-\sigma)f(\sigma) d\sigma$.

En appliquant de nouveau le Lemme 3, on trouve que $\int_0^t G(t-\sigma)f(\sigma) d\sigma$ est presque-périodique, ce qui prouve le théorème.