

Montages à amplificateur linéaire intégré

Plan du cours

I	Amplificateur linéaire intégré	1
I.A	Le composant	1
I.B	Régimes linéaire et de saturation	2
I.C	Modèle de l'ALI idéal de gain infini	3
II	Exemples de montages à ALI en régime linéaire	3
II.A	Amplificateur non-inverseur	4
II.B	Intermède : théorème de Millman	4
II.C	Amplificateur inverseur	5
II.D	Intégrateur pur	6
II.E	Suiveur	7
III	Exemples de montages à ALI en régime de saturation	8
III.A	Comparateur simple	9
III.B	Comparateur à hystérésis non-inverseur	10

- | | |
|---|--|
|  Résultat à connaître par cœur. |  Méthode à retenir, mais pas le résultat. |
|  Démonstration à savoir refaire. |  Aspect qualitatif uniquement. |

Les paragraphes sans mention en marge sont là pour faciliter votre compréhension ou pour votre culture mais n'ont pas forcément besoin d'être appris en tant que tel.

Ce chapitre est un bonus de fin d'année : complètement hors du programme de MPSI, à la limite du programme de MP-MP*, mais en plein dans ceux de PSI-PSI* (et de PCSI). Ainsi, nous le traiterons en fonction du temps restant et sans doute pas jusqu'au bout, ce qui n'a aucune importance.

Ce chapitre étudie un nouveau composant électronique, l'**amplificateur linéaire intégré**, qui permet de réaliser des circuits électriques beaucoup plus riches qu'avec les seuls dipôles connus jusqu'à présent. Je l'ai également choisi car il permet de retravailler et d'approfondir des notions fondamentales d'électronique, utiles à chaque TP ou presque mais qui font finalement l'objet d'assez peu de chapitres sur les deux années de CPGE.

I - Amplificateur linéaire intégré

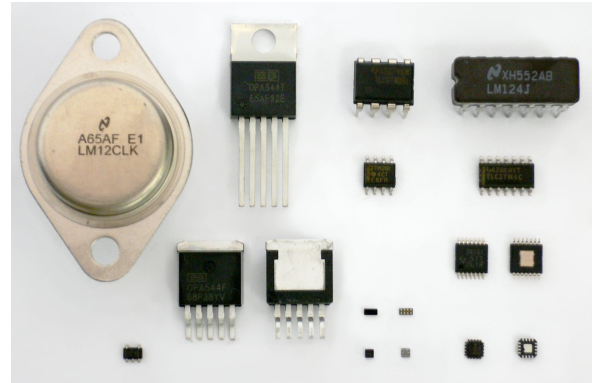
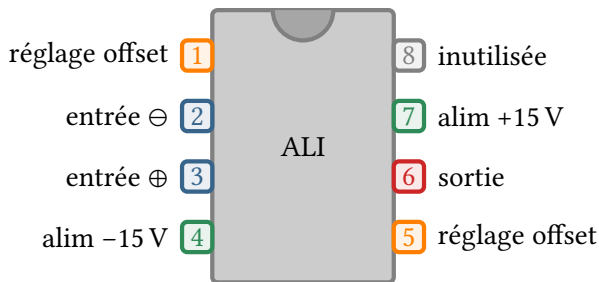
I.A - Le composant

Un ALI est un composant à deux entrées dites **non inverseuse** $\oplus$ et **inverseuse** $\ominus$, qui nécessite d'être alimenté par une source de tension symétrique ± 15 V. Il s'agit d'un **circuit intégré**, c'est-à-dire qu'il contient d'autres composants élémentaires (résistances, condensateurs, transistors). Le schéma du circuit intégré dépend du modèle d'ALI utilisé, et est donné dans la fiche technique (« datasheet ») du composant.

Autres noms usuels : amplificateur opérationnel, « ampli op », AO, AOp, etc.

Remarque culturelle : Les ALI ont été développés dans les années 1940-1950 pour réaliser des opérations mathématiques dans les calculateurs analogiques : addition, intégration, etc. Certains exemples seront présentés dans ce cours et en TD. Le coût unitaire s'élevait à l'époque à une vingtaine de dollars, il n'est aujourd'hui que de quelques centimes.

• Un ALI vu de l'extérieur



• Représentation conventionnelle

Seules trois bornes sont représentées : les deux entrées et la sortie. L'alimentation continue n'est jamais représentée ... mais il ne faut pas l'oublier lorsque l'on branche un ALI !

(R)

Espace 1

⚠⚠⚠ **Attention !** Il faut absolument distinguer les deux bornes d'entrée qui jouent des rôles très différents.

I.B - Régimes linéaire et de saturation

I.B.1 - Saturation en tension

La tension de sortie de l'ALI ne peut pas sortir d'un intervalle $[-V_{\text{sat}}; +V_{\text{sat}}]$. On distingue alors deux régimes de fonctionnement :

- ▶ si $v_s = \pm V_{\text{sat}}$: **régime de saturation** (en tension), la tension de sortie ne peut plus évoluer même si l'entrée évolue, la relation entrée-sortie n'est donc plus linéaire ;
- ▶ si $-V_{\text{sat}} < v_s < +V_{\text{sat}}$: **régime linéaire** (sous réserve que le courant le permette), la tension de sortie du montage est reliée à la tension d'entrée par une relation linéaire, ce qui permet d'utiliser tout l'attirail mathématique des systèmes linéaires, et en particulier la représentation complexe.

La tension de saturation est légèrement inférieure à la tension d'alimentation de l'ALI, typiquement 13 V, mais on considère souvent dans les exercices $V_{\text{sat}} = 15 \text{ V}$.

I.B.2 - Influence des rétroactions

On appelle **boucle de rétroaction** ou **chaîne de retour** un dispositif par lequel le signal de sortie d'un système affecte le signal d'entrée. Le système est alors dit **bouclé**. Ici, cela consiste à relier la borne de sortie de l'ALI par un dipôle ou une association de dipôles à l'une ou l'autre des bornes d'entrée. La rétroaction est dite **négative** si elle se fait sur l'entrée $\ominus$ et **positive** si elle a lieu sur l'entrée $\oplus$.

Remarque : La notion de rétroaction se voit naturellement en électronique, mais est en fait beaucoup plus générale. Par exemple, le système climatique terrestre est soumis à de nombreuses rétroactions.

On admet les résultats suivants :

(R)



Le régime de fonctionnement de l'ALI dépend des rétroactions présentes dans le montage :

- Aucune rétroaction : toujours régime de saturation.
- Une unique rétroaction négative : régime linéaire en général.
- Une unique rétroaction positive : toujours régime de saturation.
- Deux rétroactions $\oplus$ et $\ominus$: impossible de savoir a priori.

I.B.3 - Saturation en courant

L'intensité de sortie de l'ALI est également limitée : elle ne peut pas sortir d'un intervalle $[-i_{\text{sat}}; +i_{\text{sat}}]$, où le courant de saturation $i_{\text{sat}} \simeq 40 \text{ mA}$.

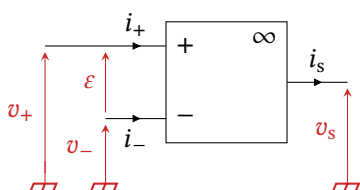
- si $-i_{\text{sat}} < i_s < +i_{\text{sat}}$, l'ALI peut fonctionner en régime linéaire sous réserve que la tension le permette ;
- si $i_s = \pm i_{\text{sat}}$, l'ALI est **saturé en courant** et la relation entrée-sortie n'est plus linéaire ... mais attention $v_s \neq V_{\text{sat}}$ a priori.

En pratique, dans les montages usuels, la saturation en courant est nettement moins contraignante que la saturation en tension : pour ce chapitre d'introduction, on ne s'en souciera donc pas.

I.C - Modèle de l'ALI idéal de gain infini

Le modèle de l'ALI idéal de gain infini est un modèle de comportement de l'ALI qui permet d'étudier un très grand nombre de montages avec l'avantage de la simplicité. Il n'explique pas tout du comportement de l'ALI (en particulier il ne permet pas de démontrer les résultats précédents sur les rétroactions), mais c'est celui qui est utilisé « par défaut » dans tous les exercices.

Modèle de l'ALI idéal de gain infini :

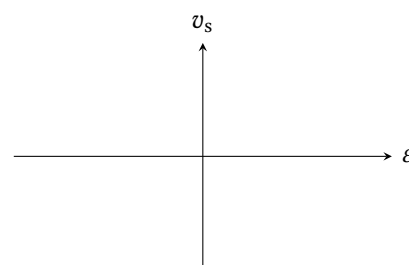


- les courants d'entrée i_+ et i_- sont nuls ;
- le courant de sortie i_s et la tension de sortie v_s sont indépendants ;
- tension de sortie limitée à $|v_s| \leq V_{\text{sat}} \lesssim 15 \text{ V}$ et saturation au delà ;
- courant de sortie limité à $|i_s| \leq i_{\text{sat}} \simeq 40 \text{ mA}$ et saturation au delà ;

Relation entrée-sortie :

- régime linéaire $\iff \varepsilon = 0$;
- saturation haute $v_s = +V_{\text{sat}} \iff \varepsilon > 0$;
- saturation basse $v_s = -V_{\text{sat}} \iff \varepsilon < 0$.

La **caractéristique statique** en est une représentation graphique.



⚠⚠⚠ **Attention !** Ne pas confondre le modèle de l'ALI idéal avec le fonctionnement linéaire : un ALI idéal peut fonctionner en régime de saturation, de même qu'un ALI « réel » peut fonctionner en régime linéaire.

II - Exemples de montages à ALI en régime linéaire

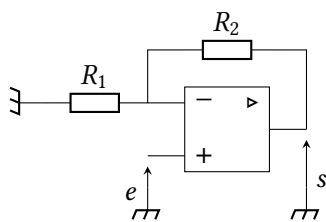
Rappel : pour un ALI en régime linéaire, on sait que

$$\varepsilon = 0 \quad \text{soit} \quad v_+ = v_- .$$

Le but de l'étude consiste à établir une relation type fonction de transfert entre la tension de sortie et la tension d'entrée du montage.

⚠⚠⚠ **Attention !** Ne pas confondre la tension d'entrée du montage e avec la tension $\varepsilon = v_+ - v_-$.

II.A - Amplificateur non-inverseur



- Régime de fonctionnement de l'ALI

Espace 2

- Relation entrée-sortie

D

Espace 3

- Un fonctionnement en régime de saturation est possible !

La tension de sortie de l'ALI vérifie toujours $|s| \leq V_{\text{sat}}$: ainsi, l'ALI du montage amplificateur non-inverseur peut saturer si la tension d'entrée devient trop élevée. Dans ce cas,

Q

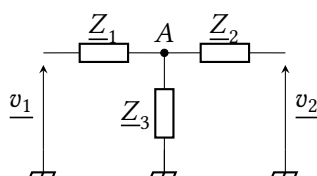
$$s = \pm V_{\text{sat}} \quad \text{mais} \quad s \neq \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) e.$$

La relation entrée-sortie établie précédemment n'est plus valable : c'est logique, la démonstration suppose le régime linéaire ... or ce n'est plus le cas.

II.B - Intermède : théorème de Millman

Le **théorème de Millman** est une autre méthode d'étude des montages à ALI que le pont diviseur. Il conduit évidemment aux mêmes résultats, mais en fonction des montages l'une ou l'autre méthode permet d'alléger les calculs, parfois de façon significative. Ce consiste à réécrire la loi des nœuds en terme des tensions, puis finalement des potentiels aux extrémités des branches aboutissant au nœud d'intérêt.

Démonstration sur un exemple : raisonnons au nœud A.



Espace 4

Généralisation :**Théorème de Millman :**

Le potentiel d'un nœud connecté à N branches contenant un dipôle d'admittance complexe $\underline{Y}_n$ et dont la deuxième extrémité se trouve au potentiel $\underline{v}_n$ s'écrit

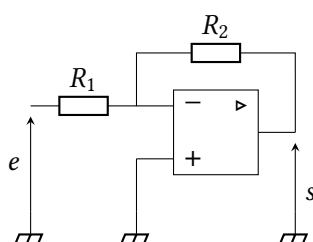
$$\underline{v} = \frac{\sum_{n=1}^N \underline{Y}_n \underline{v}_n}{\sum_{n=1}^N \underline{Y}_n}.$$

Appliquer le théorème de Millman aux entrées de l'ALI est souvent une manière très efficace d'établir la relation entrée-sortie des montages ... mais ce théorème recèle quelques pièges.

⚠⚠⚠ **Attention !** Ne pas oublier au dénominateur l'admittance complexe des dipôles reliés à la masse !

⚠⚠⚠ **Attention !** L'admittance complexe n'est définie qu'en régime sinusoïdal forcé, donc dans un circuit linéaire. La théorème de Millman ne peut pas s'appliquer dans un montage contenant un ALI fonctionnant en régime de saturation, sauf s'il ne contient que des résistances.

⚠⚠⚠ **Attention !** Le théorème de Millman vient de la loi des nœuds, il faut donc être très prudent lorsque le nœud que l'on souhaite étudier est relié à une branche dans laquelle seul le courant est connu. C'est en particulier le cas à la sortie de l'ALI, où le théorème de Millman ne doit jamais être appliqué.

II.C - Amplificateur inverseur

Contrairement au montage non-inverseur précédent, l'entrée est cette fois imposée sur R_1 alors que l'entrée $\oplus$ de l'ALI est reliée à la masse.

- Régime de fonctionnement de l'ALI**

Espace 5

- **Relation entrée-sortie**

Les potentiels d'intérêt e et s se trouvent « aux extrémités » du montage, or utiliser la relation de fonctionnement linéaire demande d'exprimer v_- qui se trouve « au milieu ».

↪ le théorème de Millman est plus efficace qu'un pont diviseur.

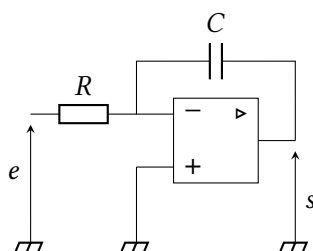
D

Espace 6

Remarque 1 : selon les résistances, le montage peut amplifier mais aussi atténuer la tension.

Remarque 2 : dans les montages contenant un seul ALI, la nature inverseuse ou non-inverseuse peut s'anticiper à partir de l'entrée de l'ALI sur laquelle est branchée la tension d'entrée du montage : si la tension d'entrée est imposée du côté de l'entrée $\ominus$ de l'ALI alors le montage est inverseur, alors que si elle est imposée du côté de l'entrée $\oplus$ alors le montage est non-inverseur.

II.D - Intégrateur pur



Les fonctions réalisables avec des montages à ALI sont bien plus riches que de la simple amplification. Le montage intégrateur en est un exemple.

- **Régime de fonctionnement de l'ALI**

Le montage compte une unique rétroaction, et elle est négative, le fonctionnement linéaire est donc probable.

- **Relation entrée-sortie**

Pont diviseur ou théorème de Millman ?

Espace 7

D

Fonction de transfert dans le domaine fréquentiel :

Espace 8

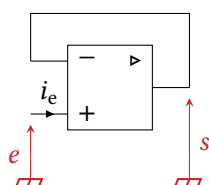
Relation différentielle dans le domaine temporel :



Espace 9

⚠⚠⚠ **Attention !** Ne pas oublier la constante d'intégration $s(0)$!

II.E - Suiveur



- **Régime de fonctionnement de l'ALI**

Le montage compte une unique rétroaction, qui est négative, donc le régime linéaire est probable.

- **Relation entrée-sortie**



Espace 10

• Impédance d'entrée

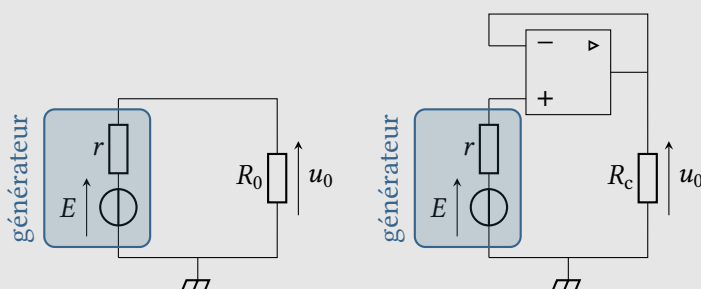
On appelle **impédance d'entrée** d'un montage le rapport entre la tension et le courant d'entrée lorsqu'il est en sortie ouverte, c'est-à-dire que la sortie n'est aux bornes d'aucun dipôle.

$$\underline{Z_e} = \frac{e}{i_e}$$

Tout l'intérêt d'un montage suiveur réside dans son impédance d'entrée !

Espace 11

Application 1 : Intérêt d'un montage suiveur



Considérons la situation ci-dessous où l'on cherche à alimenter une charge de résistance R_c avec un générateur de fém E et de résistance interne r . Exprimer la tension u_0 aux bornes de la charge avec et sans suiveur. Conclure sur l'intérêt du montage.

Ajouter un montage suiveur peut également avoir un intérêt en sortie d'un filtre : si un étage de faible résistance d'entrée est placé en sortie du filtre, alors il affecte la fonction de transfert, de façon parfois très notable, cf. TP sur l'association de deux filtres RC.

Un montage suiveur permet de dissocier la commande (via p.ex. un générateur extérieur) et l'apport de puissance (via l'ALI et son alimentation).

• Courant de masse

Dans l'exemple précédent, la tension aux bornes de la résistance R_c est non nulle, donc un courant la traverse ... alors qu'aucun courant ne traverse le générateur et r car l'ALI est idéal !

~>

Espace 12

La masse est un nœud par lequel un courant, inconnu a priori, peut entrer ou sortir. Il faut donc être particulièrement prudent avec la masse dans l'application de la loi des nœuds ... et du théorème de Millman qui en découle.

III - Exemples de montages à ALI en régime de saturation

Rappel : en régime de saturation, la tension de sortie de l'ALI vaut $v_s = \pm V_{\text{sat}}$ en fonction de signe de la tension d'entrée de l'ALI ε ... qui est non-nulle mais inconnue a priori.

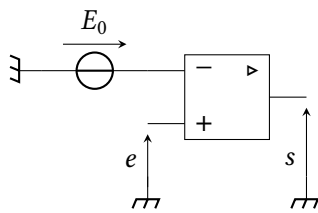
~> étudier un montage en saturation consiste à déterminer à quelle(s) condition(s) sur ε la tension ε change de signe, c'est-à-dire la bascule de $\pm V_{\text{sat}}$ à $\mp V_{\text{sat}}$ a lieu.

💣💣💣 **Attention !** Contrairement au régime linéaire, $\varepsilon \neq 0$ et sa valeur est inconnue.

Méthode : les montages à ALI en saturation se traitent par disjonction des cas

- ▶ on fait une hypothèse sur l'état de saturation de l'ALI, ce qui revient à donner la valeur de v_s et le signe de ε ;
- ▶ cet état de saturation perdure tant que le signe de ε ne change pas, on cherche donc à quelle condition sur l'entrée ε on a ε qui s'annule.

III.A - Comparateur simple



On étudie le montage comparateur simple ci-contre. La tension E_0 , supposée constante pour simplifier, est imposée par un générateur extérieur.

- **Régime de fonctionnement de l'ALI**

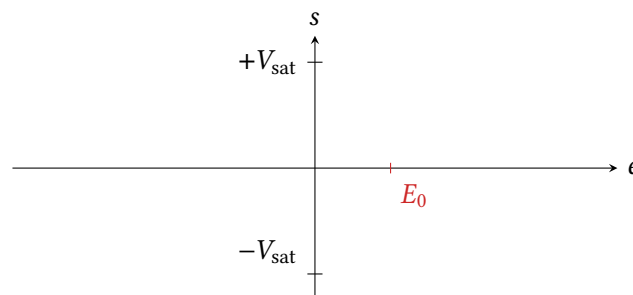
L'ALI ne compte aucune rétroaction, il ne peut donc fonctionner qu'en régime de saturation.

- **Conditions de bascule**

D

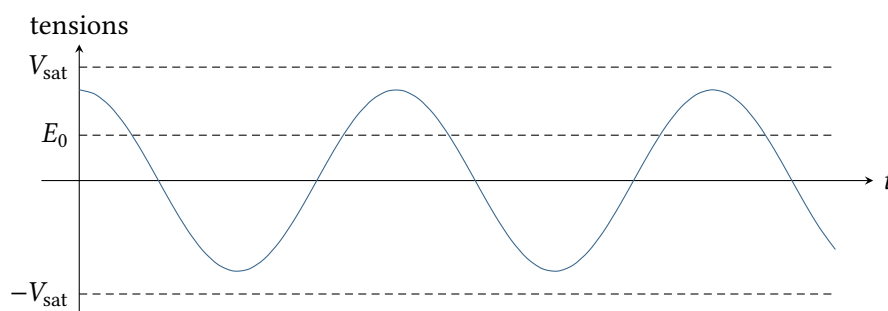
Espace 13

- **Diagramme entrée-sortie**



M

- **Effet sur un signal sinusoïdal**



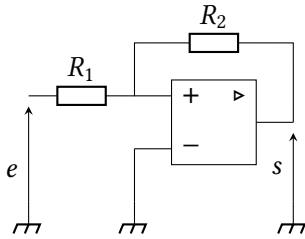
M

- **Intérêt et limitations**

Si la tension d'entrée e fluctue rapidement autour de E_0 alors la tension de sortie fluctue elle aussi rapidement entre $\pm V_{\text{sat}}$. Cela peut être un avantage (capteur de présence, etc.), mais pas toujours : on peut penser par exemple à un store qui devrait monter ou descendre automatiquement en fonction de l'ensoleillement, il ne faudrait pas que de faibles variations de luminosité dues à un petit nuage ou au passage d'un oiseau devant le capteur le fassent monter et descendre cent fois en une après-midi.

→ nécessité d'autres montages, plus robustes aux fluctuations.

III.B - Comparateur à hystérésis non-inverseur



- **Régime de fonctionnement de l'ALI**

L'ALI ne compte qu'une rétroaction positive, il ne peut donc fonctionner qu'en régime de saturation.

- **Expression générale de ε**

Commençons par exprimer de façon générale ε en fonction des tensions e et s , sans rien supposer sur l'état de saturation haute ou basse de l'ALI.

D

Espace 14

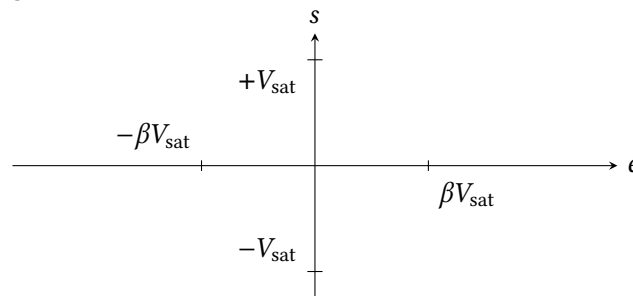
- **Conditions de bascule**

D

Espace 15

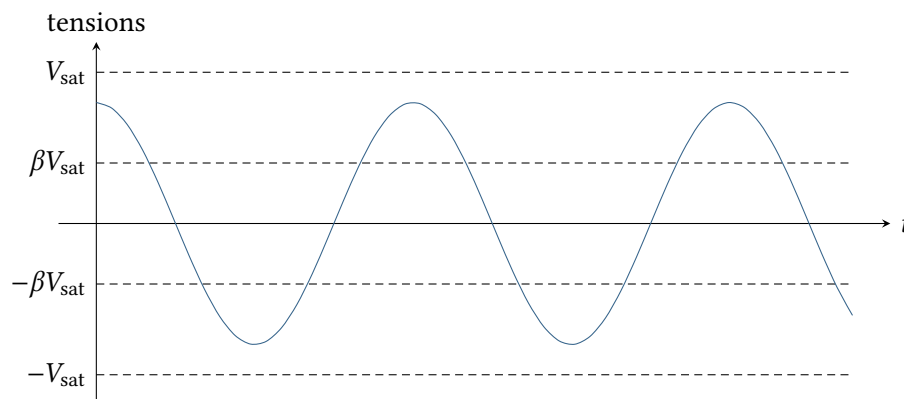
→ la condition de bascule n'est pas la même selon l'état de saturation de l'ALI.

- **Diagramme entrée-sortie**



D

- **Effet sur un signal sinusoïdal**



M

- **Généralisation : phénomène d'hystérésis**

On constate clairement sur le diagramme entrée-sortie que dans toute la zone intermédiaire $-\beta V_{\text{sat}} < e < \beta V_{\text{sat}}$ le système peut être dans l'un ou l'autre état de saturation en fonction de son état antérieur : il garde ainsi une **mémoire** de cet état, ce qui rend la comparaison robuste aux fluctuations.



On dit qu'un système présente un **phénomène d'hystérésis**
si son état actuel dépend de son évolution antérieure
et pas seulement des valeurs instantanées de la (des) grandeur(s) d'entrée.

Remarque culturelle : Ce phénomène se rencontre dans de nombreux domaines de la physique : magnétisme, hydraulique, mécanique des matériaux polymères, etc.