

## **Physique**

### **Produit vectoriel**

#### **Analyse Vectorielle**

Champ scalaire, champ vectoriel

Champ à circulation conservative

Champ à flux conservatif

Circulation dans un champ de vecteur

Divergence d'un champ vectoriel

Flux au travers d'une surface

Gradient d'un champ scalaire

Laplacien

Notation nabla

Rotationnel d'un champ de vecteur

Systèmes de coordonnées

orthogonales

Théorème de Green-Ostrogradski

#### **Électricité**

Amplificateurs Opérationnels

Physique ► Électricité

# **Amplificateurs Opérationnels**

---

# Systèmes de coordonnées orthogonales

Définitions élémentaires de système de coordonnées orthogonales en analyse vectorielle.

---

On peut décrire l'espace dans un système de coordonnées  $(q_1, q_2, q_3)$  associé au trièdre local  $(\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3)$ .

Un déplacement élémentaire  $\overrightarrow{dM}$  s'exprime

$$\begin{aligned}\overrightarrow{dM} &= h_1(q_1, q_2, q_3) dq_1 \vec{e}_1 \\ &\quad + h_2(q_1, q_2, q_3) dq_2 \vec{e}_2 \\ &\quad + h_3(q_1, q_2, q_3) dq_3 \vec{e}_3\end{aligned}$$

- En cartésiennes  $(x, y, z)$  :

$$h_1 = h_2 = h_3 = 1$$

$$\overrightarrow{dM} = dx \vec{u}_x + dy \vec{u}_y + dz \vec{u}_z$$

- En cylindriques  $(r, \theta, z)$  :

$$h_1 = h_3 = 1 \quad h_2 = r$$

$$\overrightarrow{dM} = dr \vec{u}_r + r d\theta \vec{u}_\theta + dz \vec{u}_z$$

- En sphériques  $(r, \theta, \varphi)$  :

$$h_1 = 1 \quad h_2 = r \quad h_3 = r \sin \theta$$

$$\overrightarrow{dM} = dr \vec{u}_r + r d\theta \vec{u}_\theta + r \sin \theta d\varphi \vec{u}_\varphi$$

## Champ scalaire, champ vectoriel

Définitions d'un champ scalaire,  
champ vectoriel.

---

Un champ est une grandeur dans un domaine  $D$  de l'espace à un instant  $t$ , noté  $\vec{G}(\vec{r}, t)$ .

Un champ peut être vectoriel ou scalaire selon si la grandeur qu'il représente l'est.

Un champ est dit

**Uniforme** s'il est indépendant de  $\vec{r}$ .

**Stationnaire ou permanent** s'il est indépendant de  $t$ .

**Constant** S'il est les deux

- On appelle ligne de champ une courbe de l'espace qui est en tout points tangente au champ.
- Pour un champ  $f(\vec{r}, t)$ , on appelle surface équi- $f$  une surface où  $f$  est uniforme.

# Gradient d'un champ scalaire

Définition du gradient d'un champ scalaire.

Pour un champ scalaire  $f(\vec{r}, t)$ . On définit le gradient de  $f$ , noté  $\overrightarrow{\text{grad}} f$  ou  $\nabla f$  afin que

$$df = \nabla f \cdot d\vec{M}$$

## En coordonnées cartésiennes

$$\overrightarrow{\text{grad}} f = \nabla f = \frac{\partial f}{\partial x} \vec{u}_x + \frac{\partial f}{\partial y} \vec{u}_y + \frac{\partial f}{\partial z} \vec{u}_z$$

Car

$$d\vec{M} = dx \vec{u}_x + dy \vec{u}_y + dz \vec{u}_z$$

$$\begin{aligned} df &= \frac{\partial f}{\partial x} dx + \frac{\partial f}{\partial y} dy + \frac{\partial f}{\partial z} dz \\ &= \nabla f \cdot d\vec{M} \end{aligned}$$

## En général

$$\nabla f = \frac{1}{h_1} \frac{\partial f}{\partial q_1} \vec{e}_1 + \frac{1}{h_2} \frac{\partial f}{\partial q_2} \vec{e}_2 + \frac{1}{h_3} \frac{\partial f}{\partial q_3} \vec{e}_3$$

## Cas particulier

- En sphérique :  $\nabla \frac{1}{r} = -\frac{1}{r^2} \vec{u}_r$
- En sphérique :  $\nabla r^2 = 2r \vec{u}_r$

## Flux au travers d'une surface

Définition du flux au travers d'une surface.

---

On considère une fonction vectorielle  $\vec{F}(q_1, q_2, q_3)$

Pour une surface

- Fermée : on l'oriente de l'intérieur vers l'extérieur par convention.
- Ouverte : on oriente le contour sur lequel elle s'appuie et on applique la règle de la main droite.

Le flux  $\Phi$  au travers de la surface  $S$  est

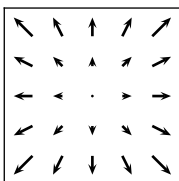
$$d\Phi = \vec{F} \cdot d\vec{S}$$
$$\Phi = \oiint_S \vec{F} \cdot d\vec{S}$$

# Divergence d'un champ vectoriel

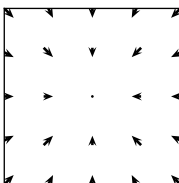
Définition de la divergence d'un champ vectoriel.

La divergence d'un champ de vecteur représente à quelle point le champ diverge ou converge en ce points. On écrit  $\text{div } \vec{F}$  ou  $\nabla \cdot \vec{F}$ .

$$\nabla \cdot \vec{F} > 0$$



$$\nabla \cdot \vec{F} < 0$$



Son expression est

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \vec{F} = \frac{1}{h_1 h_2 h_3} & \left[ \frac{\partial}{\partial q_1} (h_2 h_3 F_{q_1}) \right. \\ & + \frac{\partial}{\partial q_2} (h_1 h_3 F_{q_2}) \\ & \left. + \frac{\partial}{\partial q_3} (h_1 h_2 F_{q_3}) \right] \end{aligned}$$

En cartésiennes

$$\nabla \cdot \vec{F} = \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z}$$

Cas particuliers

- En cylindrique :  $\nabla \cdot \frac{\vec{u}_r}{r} = 0$  (sauf en 0)
- En sphérique :  $\nabla \cdot \frac{\vec{u}_r}{r^2} = 0$  (sauf en 0)
- $\nabla \cdot \vec{r} = \dim E$

# **Théorème de Green-Ostrogradski**

Énoncé du théorème de Green-Ostrogradski.

---

Pour un champ vectoriel  $\vec{F}$  et une surface fermée  $S$  qui délimite un volume  $V$ , on a

$$\Phi = \oiint_S \vec{F} \cdot \overrightarrow{dS} = \iiint_V \nabla \cdot \vec{F} \, d\tau$$

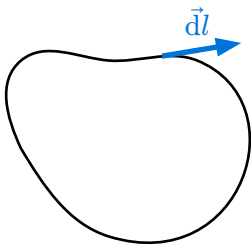


## Circulation dans un champ de vecteur

Définition de la circulation dans un champ de vecteurs.

---

Pour  $C$  un contour orienté



On définit la circulation du champ  $\vec{F}$  sur  $C$  comme

$$d\mathcal{C} = \vec{F} \cdot \vec{dl}$$
$$\mathcal{C} = \int_C \vec{F} \cdot \vec{dl}$$

# Rotationnel d'un champ de vecteur

Définition du rotationnel d'un champ de vecteur.

---

$$\overrightarrow{rot} \vec{F} = \nabla \wedge \vec{F}$$

$$= \begin{pmatrix} \frac{1}{h_2 h_3} \left[ \frac{\partial (h_3 F_{q_3})}{\partial q_2} - \frac{\partial (h_2 F_{q_2})}{\partial q_3} \right] \\ \frac{1}{h_3 h_1} \left[ \frac{\partial (h_1 F_{q_1})}{\partial q_3} - \frac{\partial (h_3 F_{q_3})}{\partial q_1} \right] \\ \frac{1}{h_1 h_2} \left[ \frac{\partial (h_2 F_{q_2})}{\partial q_1} - \frac{\partial (h_1 F_{q_1})}{\partial q_2} \right] \end{pmatrix}$$

En cartésienne

$$\nabla \wedge \vec{F} = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_z}{\partial y} - \frac{\partial F_y}{\partial z} \\ \frac{\partial F_x}{\partial z} - \frac{\partial F_z}{\partial x} \\ \frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y} \end{pmatrix}$$

# Produit vectoriel

Expression du produit vectoriel.

---

$$\begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} \wedge \begin{pmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \begin{vmatrix} a_y & b_y \\ a_z & b_z \end{vmatrix} \\ - \begin{vmatrix} a_x & b_y \\ a_z & b_z \end{vmatrix} \\ \begin{vmatrix} a_x & b_y \\ a_z & b_z \end{vmatrix} \end{pmatrix} \\ = \begin{pmatrix} a_y b_z - b_y a_z \\ a_z b_y - b_z a_y \\ a_x b_z - b_y a_z \end{pmatrix}$$

## Propriétés

$$\vec{u} \wedge \vec{v} = -(\vec{v} \wedge \vec{u})$$

$$(\vec{u} \wedge \vec{v}) \cdot \vec{w} = [\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}]$$

$$= [\vec{w}, \vec{u}, \vec{v}]$$

$$= [\vec{v}, \vec{w}, \vec{v}]$$

$$\vec{u} \wedge \vec{u} = 0$$

# Notation nabla

Notation nabla.

---

En coordonnées cartésiennes, on “définit”

$$\nabla = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{pmatrix}$$

Ainsi on retrouve les formules des opérateurs (toujours en cartésiennes)

$$\overrightarrow{grad} f = \nabla f$$

$$\text{div } \vec{F} = \nabla \cdot \vec{F}$$

$$\overrightarrow{rot} \vec{F} = \nabla \wedge \vec{F}$$

En général

$$\nabla = \begin{pmatrix} \frac{1}{h_1} \frac{\partial}{\partial q_1} \\ \frac{1}{h_2} \frac{\partial}{\partial q_2} \\ \frac{1}{h_3} \frac{\partial}{\partial q_3} \end{pmatrix}$$

## Champ à circulation conservative

Définition de champ à circulation conservative.

Un champ  $\vec{F}$  est dit à circulation conservative ssi pour toute courbe fermée  $\mathcal{C}$  on a

$$\oint_{\mathcal{C}} \vec{F} \cdot d\vec{l} = 0$$

Ainsi la circulation de toute courbe passant par  $A$  et  $B$  deux points est la même, elle ne dépend pas du chemin choisis.

On peut alors définir le potentiel  $V$ , un champ scalaire tel que

$$V(A) = V_A$$

$$V(B) = V_A + \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{l}$$

Entre  $\vec{M}$  et  $\vec{M} + d\vec{M}$

$$V(M) - V(M + dM) = dV(M) = \vec{F} \cdot d\vec{M}$$

Ainsi

$$\vec{F} = \nabla V$$

De plus

$$\oint_{\mathcal{C}} \vec{F} \cdot d\vec{l} = \iint_S (\nabla \wedge \vec{F}) \cdot d\vec{S} = 0$$

$$\Rightarrow \nabla \wedge \vec{F} = 0 \quad (\nabla \wedge (\nabla V) = 0)$$

## Champ à flux conservatif

Définition d'un champ à flux conservatif.

---

Un champ  $\vec{F}$  est dit à flux conservatif si pour toute surface  $S$  fermée qui délimite un volume  $V$ .

$$\oiint_S \vec{F} \cdot \overrightarrow{dS} = 0$$

Ainsi

$$\begin{aligned} \oiint_S \vec{F} \cdot \overrightarrow{dS} &= \iiint_V \nabla \cdot \vec{F} \, d\tau = 0 \\ \Rightarrow \nabla \cdot \vec{F} &= 0 \quad \left( \nabla \cdot (\nabla \wedge \vec{F}) = 0 \right) \end{aligned}$$

De plus on dispose de  $\vec{A}$  (champ potentiel vecteur, H.P.) tel que

$$\vec{F} = \nabla \wedge \vec{A}$$

# Laplacien

Définition du laplacien d'un champ.

---

## Scalaire

On appelle laplacien scalaire d'un champ scalaire  $V$  le champ scalaire

$$\Delta V = \nabla \cdot (\nabla V)$$

En cartésiennes :

$$\Delta V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2}$$

En général :

$$\Delta V = \frac{1}{h_1 h_2 h_3} \left[ \frac{\partial}{\partial q_1} \left( \frac{h_2 h_3}{h_1} \frac{\partial V}{\partial q_1} \right) + \frac{\partial}{\partial q_2} \left( \frac{h_1 h_3}{h_2} \frac{\partial V}{\partial q_2} \right) + \frac{\partial}{\partial q_3} \left( \frac{h_1 h_2}{h_3} \frac{\partial V}{\partial q_3} \right) \right]$$

## Vectoriel

On appelle laplacien vectoriel d'un champ vectoriel  $\vec{F}$  le champ vectoriel

$$\Delta \vec{F} = \nabla (\nabla \cdot \vec{F}) - \nabla \wedge (\nabla \wedge \vec{F})$$

En cartésiennes :

$$\Delta \vec{F} = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 F_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 F_x}{\partial z^2} \\ \frac{\partial^2 F_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 F_y}{\partial z^2} \\ \frac{\partial^2 F_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 F_z}{\partial z^2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta F_x \\ \Delta F_y \\ \Delta F_z \end{pmatrix}$$