

PT PHYSIQUE
2020—2021

ELEC 4

**Électronique
numérique**



courtesy of : "© Raimond Spekking / CC BY-SA 3.0 (via Wikimedia Commons)"

$$h]_e^{\text{na}} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \text{Cu}^{\text{na}} \text{u}^{\text{na}} \text{Zn}^{\text{na}} \text{C}^{\text{na}} \text{Zn}^{\text{na}} \text{rot} E =$$

$$\text{div} \vec{j} = 0 \quad \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0} H_{\text{ALI}} = \frac{d}{\Delta_{\text{vap}}} \frac{\mu_0}{T_{\text{vap}}}$$

$$\frac{2\pi}{\lambda_0} \vec{j} \cdot \vec{E} + \text{div} \left(\frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_{\text{vap}}^{\text{vap}}} \right) = 0$$

$$\Delta_{\text{vap}} = \frac{130,7}{\Delta_{\text{f}}} \text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$\Delta_{\text{f}} = \sum_i \nu_i \Delta_{\text{f}} H_i^{\circ}$$

$$- (|\eta_{\text{ox}}(i)| + |\eta_{\text{red}}(i)|) \mathcal{E} V_{ri}$$

OBJECTIFS DU CHAPITRE

- À la fin de ce chapitre, vous devez être capable de :
 - Choisir une *fréquence d'échantillonnage* adaptée au signal à numériser ;
 - Choisir une *durée d'acquisition* adaptée au signal à numériser ;
 - Choisir une *carte d'acquisition de résolution* adaptée au signal à numériser ;
 - Reconnaître les effets d'une acquisition mal menée (*repliement spectral, bruit de quantification, ...*).

$$\begin{aligned}
h_e^{\text{na}} &= \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \text{Cu}^{\text{na}} \frac{\pi}{p} \frac{\text{Zn}^{\text{na}}}{p} \frac{\text{Cu}^{\text{na}}}{\sum_k b_k^{\text{na}}} \frac{\text{Zn}^{\text{na}}}{k} \text{rot } E \\
H(\omega) &= d \frac{\sum_k b_k^{\text{na}}}{\sum_j K_j^{\text{na}}} \frac{\text{Zn}^{\text{na}}}{k} \text{exp} \frac{\text{Zn}^{\text{na}}}{\partial \omega} \\
\text{div } \vec{j} &= 0 \quad \oint \vec{S} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0} H_{\text{ALI}} = \frac{d}{\Delta_{\text{vap}}^{\text{S}}} \frac{\mu_0}{T_{\text{vap}}} \\
\frac{2\pi}{\lambda_0} \frac{j}{S} \vec{M} &= \varphi_0^F (E_{\oplus}^{\text{S}} - \mu_{B_{\oplus}}^{\text{S}}) (E_{\oplus}^{\text{S}}) = 0 \\
\Delta_{\text{r}} G &= \frac{\partial G}{\partial \xi} \frac{G^{\text{S}}}{2\mu_0} \frac{\partial}{\partial \xi} H^{\text{S}} \mu_0 \varepsilon_0 \frac{F}{\partial \xi} \\
- (|\eta_{\text{ox}}(i)| + |\eta_{\text{red}}(i)|) \mathcal{E} V_{ri} &=
\end{aligned}$$

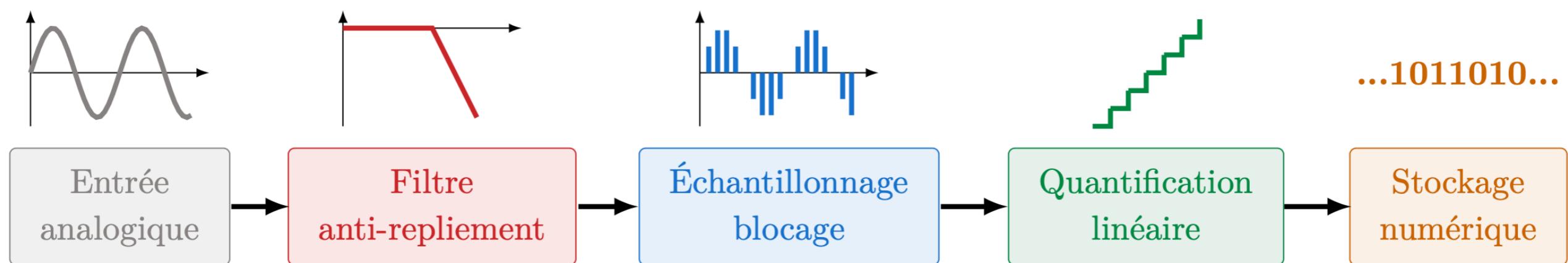
CHAÎNE D'ACQUISITION DE DONNÉES ANALOGIQUES

Donnée analogique

On appelle donnée analogique, toute grandeur représentée par un ensemble continu de valeurs.

Donnée numérique

On appelle donnée numérique, toute grandeur représentée par un ensemble discret de valeurs.



Chaîne d'acquisition complète

$$h|_e^{\infty} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \text{Cu}^{\text{N}^{+4}} \text{Ti}^{\text{N}^{+4}} \text{Zr}^{\text{N}^{+4}} \text{G}^{\text{N}^{+4}} \text{O}_{(s)} \pm \text{Zn}^{2+} \text{rot } E = \\ p \in \mathcal{H}(\mathbf{j}\omega) = d_{\sum_j b_j \mathcal{E}^{\text{N}^{+4}}}^{\sum_k b_k \mathcal{E}^{\text{N}^{+4}}} \exp \frac{i}{\tau_0} \mathcal{P}_{\partial t}$$

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \vec{J} &= 0 \\ \partial \vec{E} / \partial t + \vec{J} \cdot \vec{E} + \operatorname{div} \left(\frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_0^{\text{air}}(H_{\text{ext}})} \right) &= 0 \\ \frac{\lambda_0}{j = \gamma \vec{E}} \Delta_r G &= \frac{\overline{\partial} \overline{\partial} G^* G^*_{\mu_0 \gamma \omega}}{\partial \xi \partial \bar{\xi} \mu_0^{\text{air}} P T} H^* \mu_0 \overline{\varepsilon} \overline{P} \\ - (|\eta_{\text{ox}}(i)| + |\eta_{\text{red}}(i)|) E V_i & \left[\frac{1}{2} v^2 + g z + \right. \end{aligned}$$

ÉCHANTILLONNAGE I

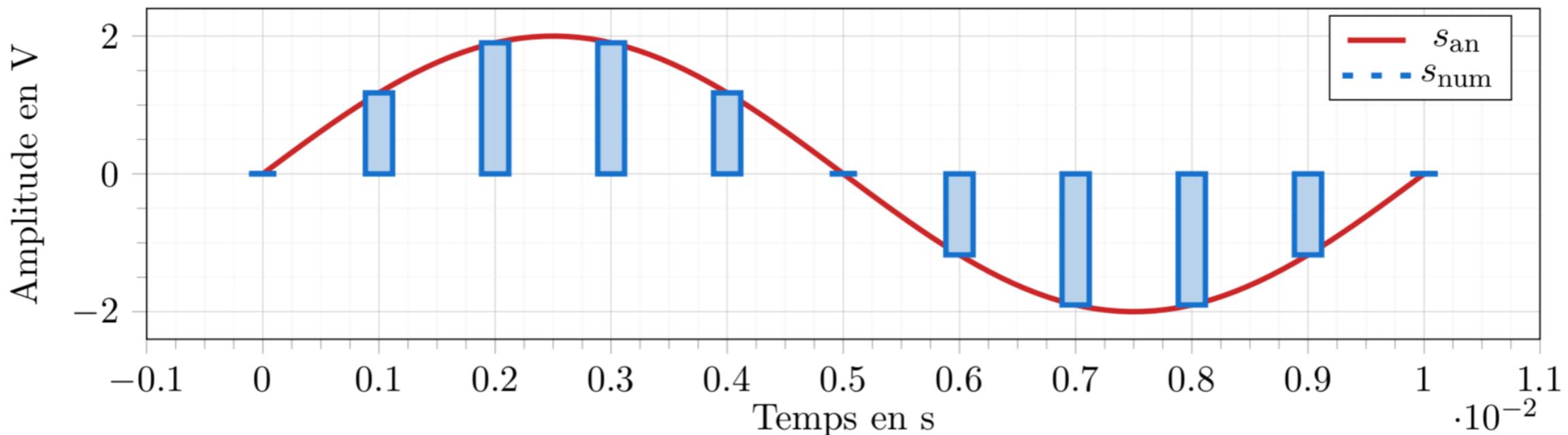
Échantillonnage

On appelle *échantillonnage*, l'opération qui consiste à sélectionner tout ou partie d'un signal analogique s_{an} , en capturant un ensemble *discret* de valeurs qui composent le signal numérique s_{num} .

Fréquence et période d'échantillonnage

On appelle *fréquence d'échantillonnage*, la fréquence f_e à laquelle sont capturées les valeurs discrètes du signal analogique $s_{\text{an}}(t)$.

On appelle *période d'échantillonnage*, l'intervalle de temps $T_e = \frac{1}{f_e}$ qui sépare deux captures des valeurs discrètes du signal analogique $s_{\text{an}}(t)$.



Signal sinusoïdal de fréquence 1 kHz, échantillonné à 10 kHz

$$\tilde{h|_e} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \text{Cu}^{\text{var}} \mp \text{Zn}^{\text{var}} \text{C}^{\text{var}}_{\mathcal{E}^{\text{var}}} \pm \text{Zn}^{\text{var}}_k \text{ rot } E =$$

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \vec{j} &= 0 & \oint \vec{S} \cdot d\vec{S} &= \frac{Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0} H_{\text{ALI}} = \frac{d}{\Delta_{\text{vap}}^S} \frac{\mu_0}{T_{\text{vap}}} \\ \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \cdot \vec{j} &= 0 & \varphi^F(SM) &= \varphi^F(E_{\oplus}^{\circ} \mu_{B_{\oplus}}^{\circ})^{(B_{2(g)})} = 0 \\ \vec{j} &= \gamma \vec{E} & \Delta_r G &= \frac{\partial \vec{G}}{\partial \vec{\xi}} \frac{\vec{G} \cdot \vec{G}}{2 \mu_0} \vec{\mathcal{F}}_r H^{\circ} \mu_0 \bar{\varepsilon}_0 \vec{F} \\ & & &= \frac{1}{2} v^2 + gz + \end{aligned}$$

EXERCICE D'APPLICATION |

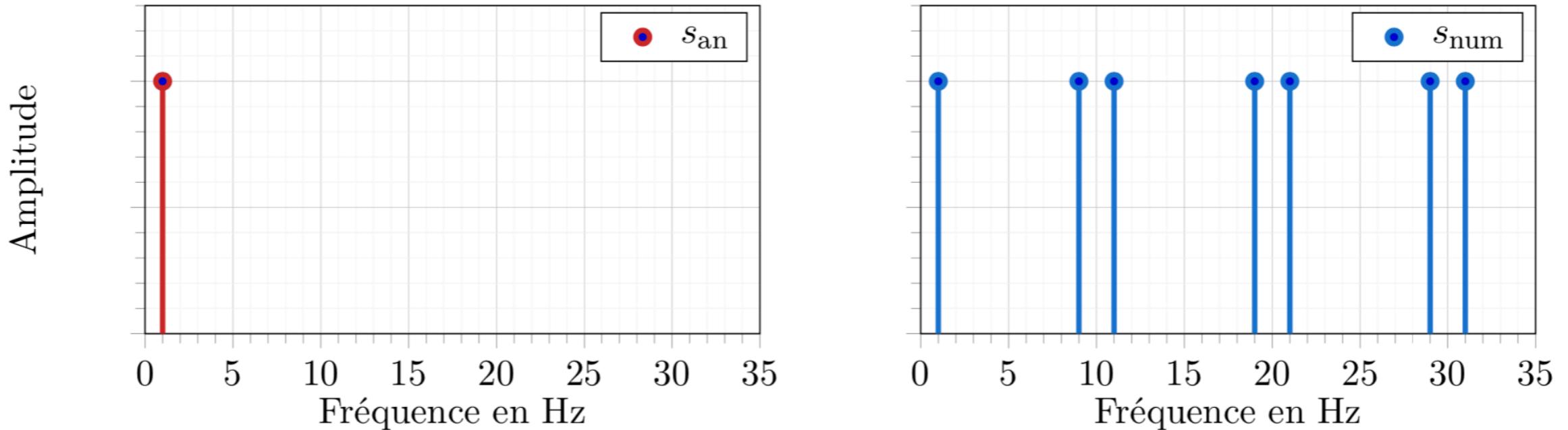
On souhaite procéder à l'enregistrement d'un concert, d'une durée $T = 60$ min, dans un format numérique sans compression (WAV par exemple). La fréquence d'échantillonnage choisie est $f_e = 44\,100$ Hz, et les valeurs sont enregistrées en stéréo sur un format 16 bit.

1. Quelle sont les fréquences minimales et maximales théoriques enregistrées dans ces conditions ?
2. Quelle taille mémoire doit-on prévoir pour ce stockage ?

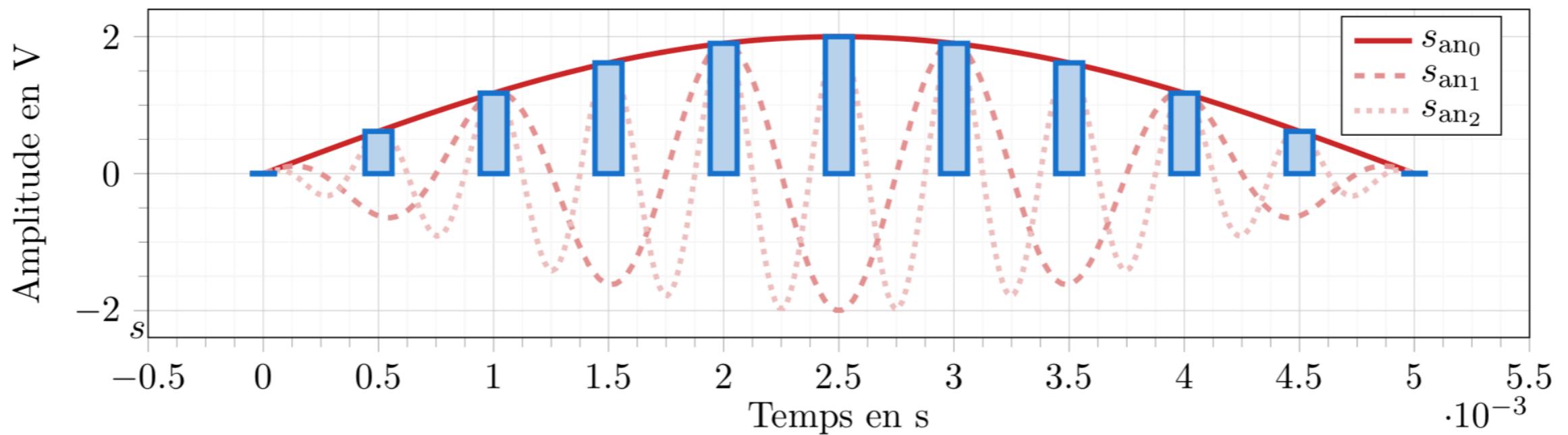
$$h_e^{\circ} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \text{Cu}^{\text{star}} \text{Zn}^{\text{star}} \text{Ge}^{\text{star}}_0 + \text{Zn}^{\text{star}} \text{rot } E = \\ p \in \mathcal{H}(\text{j}\omega) = d \frac{\sum_k b_k^* \text{Zn}^{\text{star}}}{\sum_j \text{Zn}^{\text{star}} E} = \exp \text{j} \int_{\partial \Omega} \mathcal{H}^{\text{star}} E$$

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \vec{j} &= 0 \\ \frac{\partial \pi}{\partial t} \frac{\partial}{\partial t} \vec{E} + \operatorname{div} \left(\vec{E} \wedge \vec{B} \right) &= 0 \\ \lambda_0 \frac{\partial}{\partial t} \vec{G} &= \varphi_0 \frac{\partial}{\partial t} \vec{G} \\ \vec{j} = \gamma \vec{E} & \\ - (|\eta_{\text{Ox}}(i)| + |\eta_{\text{red}}^{\text{red}}(i)|) \mathcal{E} V_{ri} & \end{aligned}$$

ÉCHANTILLONNAGE 2



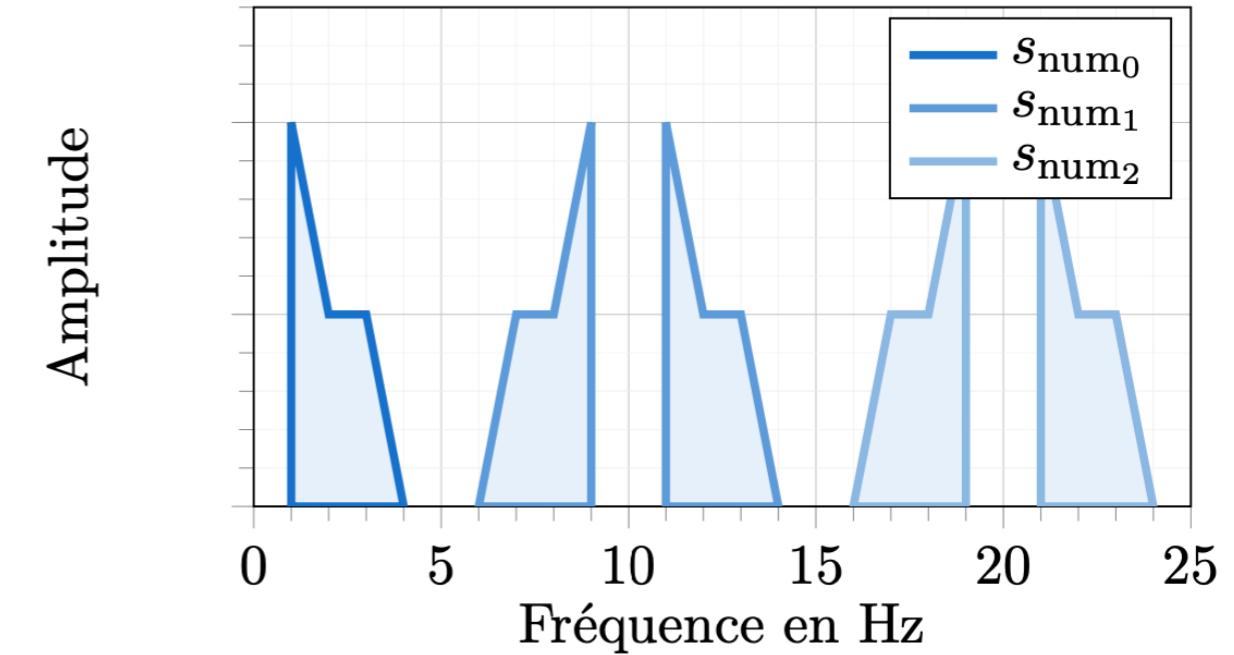
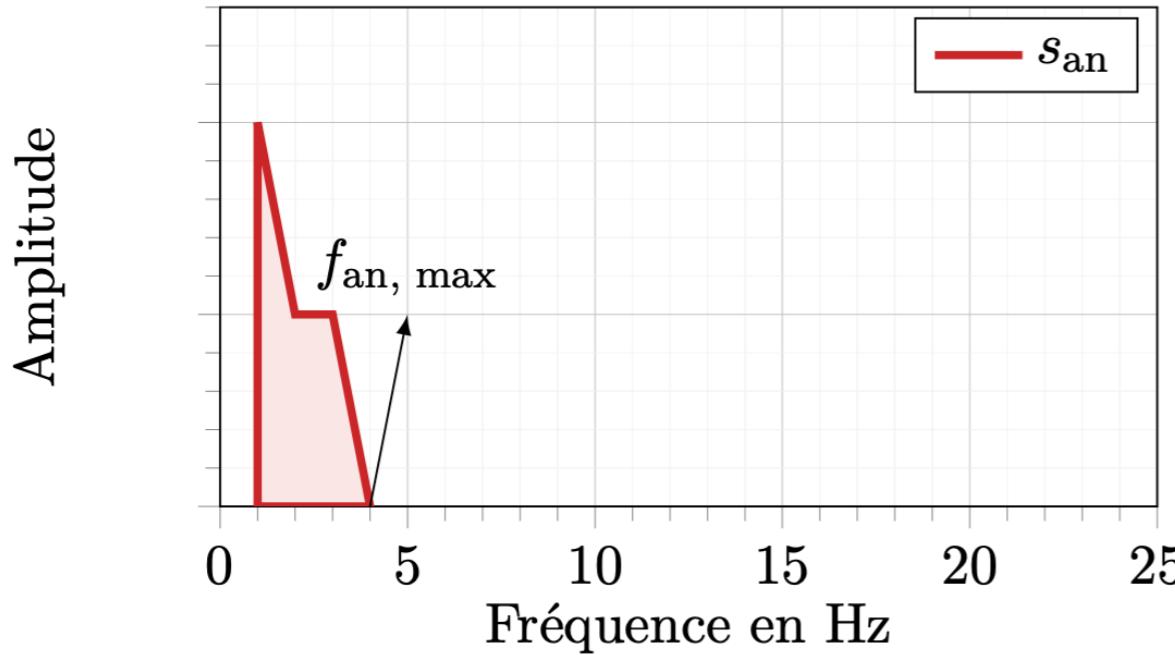
Spectre — gauche : signal analogique ; droite : signal numérisé



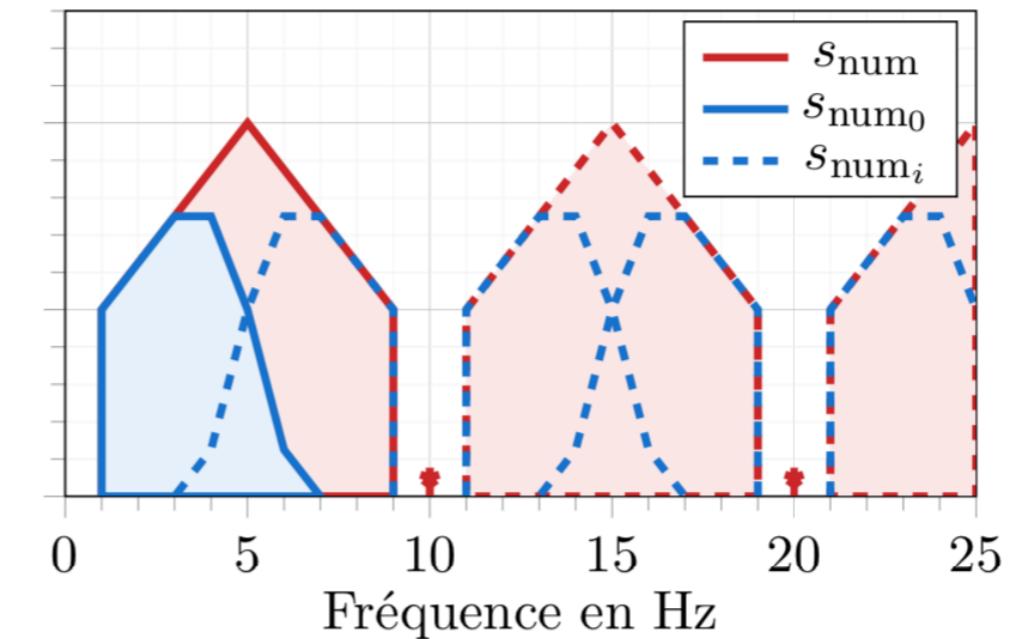
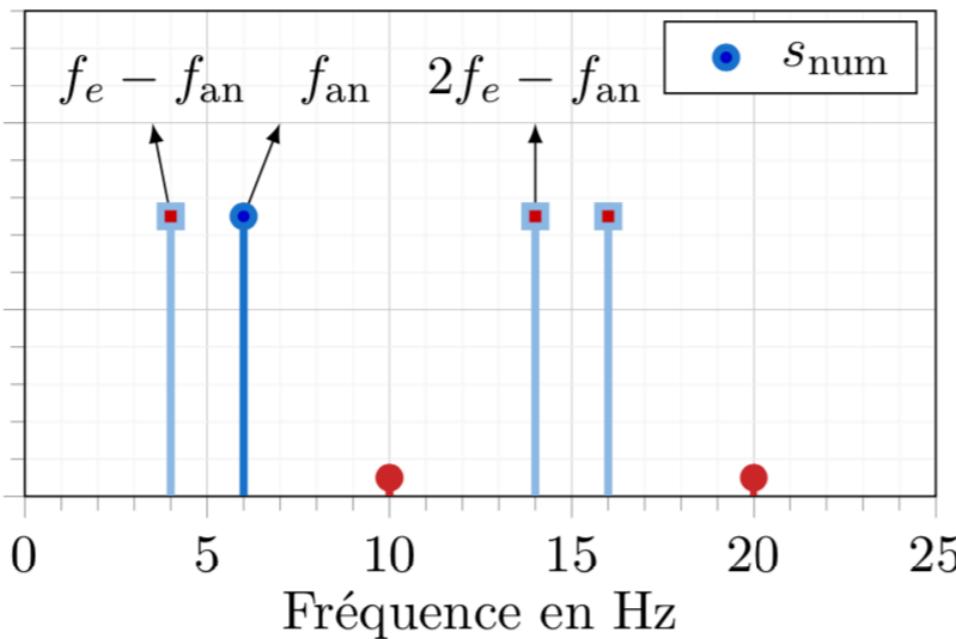
Reconstitutions possibles à partir du spectre du signal numérisé

$$\begin{aligned} h\big]_e^{\infty} &= \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \text{Cu}^{\text{ext}} \mp \text{Zr}^{\text{ext}} \text{G}^{\text{ext}}_{\text{(s)}} \pm \text{Zn}^{\text{ext}} \text{ rot } E = \\ &= \underset{p \in \tilde{H}(\text{j}\omega)}{H(\text{j}\omega)} = d \underset{\sum_k b_k}{\sum_k} \tilde{K}^{\text{ext}} \Rightarrow \text{exp} \frac{d}{\partial t} = \\ &= \iint_S \vec{E} \cdot \vec{dS} = \frac{Q_{\text{int}} H_{\text{ALI}}}{\varepsilon_0} = \frac{d}{\Delta \varepsilon_{\text{vap}}^{\text{ext}}} \frac{\mu_0}{H^{\text{ext}}(\text{ext}_{\text{(g)}})} \\ &= \text{div} \vec{\frac{d}{\partial \pi}} = 0 \\ &= \text{div} \left(\frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_{\text{ext}}^{\text{ext}}(1)_{\text{2(g)}}} \right) = 0 \\ &= 0_{30,7} \Delta_{\text{r}} H^{\circ} = \prod_{i=1}^{30} \nu_i \Delta_{\text{r}} H_i^{\circ} \\ &= \varphi_0^F \left(\frac{1}{S} M^{\circ} \right) = \varphi_0^F \left(\frac{1}{S} \frac{1}{P_{\text{ext}}} \right) \\ &= \lambda_0 \\ &= \frac{j}{\gamma \vec{E}} \\ &= \Delta_{\text{r}} G = \delta \frac{\overline{\partial} \overline{G} \overline{B}}{\overline{\partial} \overline{\xi}} \frac{G^{\text{ext}} \text{ext}^{\text{ext}}}{\overline{\partial} \overline{\mu_0}} \overline{\partial} \overline{H}^{\circ} \overline{\partial} \overline{\mu_0} \overline{\varepsilon_0} \overline{\partial} \overline{\partial} \\ &= (|\eta_{\text{ox}}(i)| + |\eta_{\text{red}}(i)|) \mathcal{F} V_{\text{r}} \eta \\ &= \frac{1}{2} v^2 + g + \end{aligned}$$

ÉCHANTILLONNAGE REPLIEMENT SPECTRAL



Pas de repliement spectral : un filtre permet de reconstituer le signal analogique initial



Repliement spectral : le signal numérisé ne permet plus de revenir au signal analogique initial

$$\begin{aligned}
& h]_e^{\circ} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \cdot \text{Cu}^{\text{ext}+} \cdot \mathcal{Z} \mathbf{H}_{(\overline{s})}^{\text{ext}} \mathbf{G}_{\text{th}}^{\text{ext}} + \text{Zn}^{\text{ext}} \cdot \text{rot } E = \\
& p \in \tilde{\mathcal{H}}(\mathbf{j}\omega) = d \frac{\sum_k b_k^* \mathbf{f}_k^*}{\sum_j a_j^* \mathbf{f}_j^*} \exp \tilde{f} \\
& \oint \oint_S \vec{E} \cdot \vec{dS} = \frac{Q_{\text{int}} H_{\text{ALI}}}{\varepsilon_0} \overline{\Delta_{\text{vap}}} \frac{d}{s} \frac{\mu_0}{\Delta_{\text{vap}}^H \text{e}^{\frac{\omega}{\omega_{\text{c}}}} \text{e}^{(\frac{\omega}{\omega_{\text{c}}})}} \\
& \text{div } \vec{\mathbf{J}} = 0 \\
& \oint \frac{\partial}{\partial \pi} \frac{\partial}{\partial \pi} \vec{E} + \text{div} \left(\frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_{\text{ext}}^{\text{ext}} \text{H}_{\text{ext}}^{\text{ext}}} \right) = 0 \\
& \frac{\lambda_0}{j = \gamma \vec{E}} = \varphi_0^F(E_{\oplus}^{\oplus} - E_{\ominus}^{\ominus}) \\
& \Delta_{\text{r}} G = \frac{\text{r} \vec{G} \vec{A} \vec{B} \vec{C} \vec{G} \text{r}_{\text{ext}}^{\text{ext}}}{\partial \vec{\xi} \sqrt{P_{\text{r}}^{\text{ext}}}} \vec{H}^{\text{ext}} \mu_0 \bar{\varepsilon} \frac{\vec{D}}{\partial \vec{\xi}} \\
& - (|\eta_{\text{Ox}}(i)| + |\eta_{\text{red}}(i)|) \mathcal{F} V_i \eta
\end{aligned}$$

THÉORÈME DE NYQUIST- SHANNON

Théorème de Nyquist-Shannon

Pour qu'un signal analogique s_{an} soit correctement échantillonné, la fréquence d'échantillonnage f_e choisie doit être au moins deux fois supérieure à la fréquence maximale f_{max} de s_{an} .

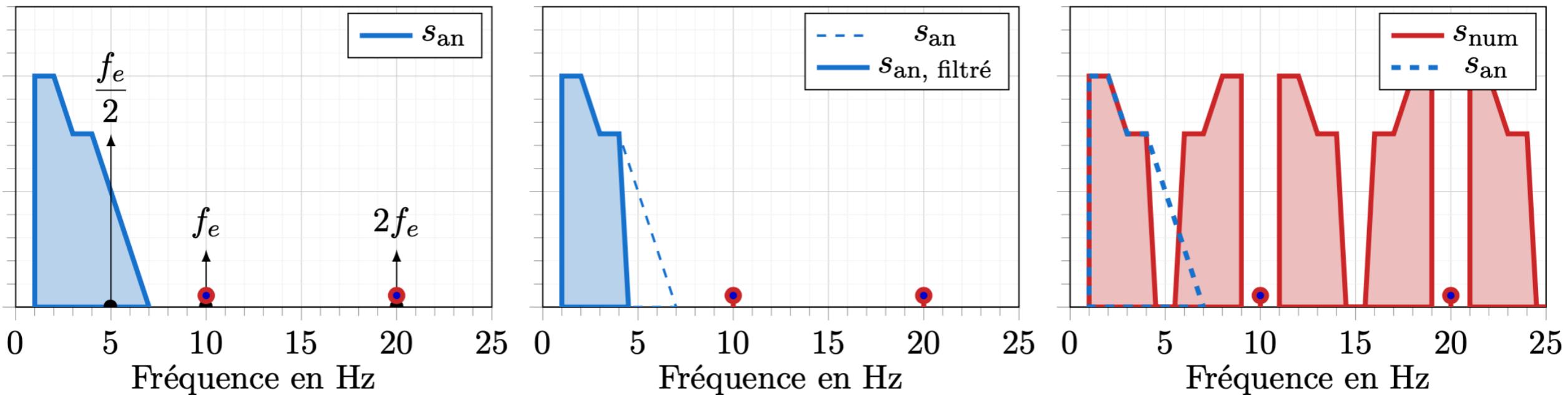
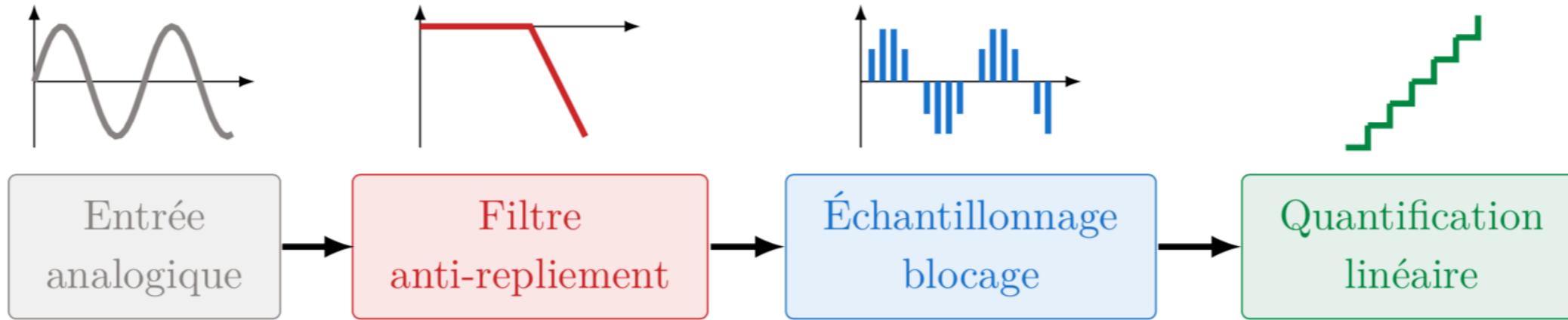
Cette contrainte est appelée *critère de NYQUIST-SHANNON* et s'écrit

$$f_e \geq 2f_{\text{an, max}} \quad \text{ou encore} \quad T_e \leq \frac{T_{\text{an, max}}}{2}$$

$$h|_e^{\circ} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \text{Cu}^{\text{xt}\tau^{\pm}} \text{Zn}^{\text{xt}\tau^{\pm}} \text{Ge}^{\text{xt}\tau^{\pm}}_0 \pm \text{Zn}^{\text{xt}\tau^{\pm}} \text{rot } E = \\ H(j\omega) = d \sum_{\substack{\sum k \\ \sum j}} \frac{\text{Zn}^{\text{xt}\tau^{\pm}}}{\Delta E} \exp \left(\frac{j\omega}{\Delta E} \right)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \vec{j} &= 0 \\ \frac{\partial \pi}{\partial t} \frac{\partial}{\partial t} \vec{E} + \operatorname{div} \left(\vec{E} \wedge \vec{B} \right) &= 0 \\ \lambda_0 \frac{\partial}{\partial t} \vec{G} &= \varphi_0 \frac{\partial}{\partial t} \vec{G} \\ \vec{j} = \gamma \vec{E} & \\ - (|\eta_{\text{Ox}}(i)| + |\eta_{\text{red}}^{\text{red}}(i)|) \mathcal{E} V_{ri} & \end{aligned}$$

FILTRE ANTI-REPLIEMENT



Le filtre anti-repliement « supprime » les fréquences supérieures à la moitié de la fréquence d'échantillonnage

$$h_e^{\text{na}} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \text{Cu}^{\text{na}} \frac{\text{p}}{p} \frac{\text{Zn}^{\text{na}}}{\text{p}} \frac{\text{Cu}^{\text{na}}}{\text{p}} \frac{\text{Zn}^{\text{na}}}{\text{p}} \frac{\text{Cu}^{\text{na}}}{\text{p}} \text{rot } E =$$

$$\vec{H}(\mathbf{j}\omega) = d \frac{\sum_k b_k^*}{\sum_j K_j^*} \frac{z_k^*}{\exp \frac{if}{\omega}}$$

$$\operatorname{div} \vec{j} = 0$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0} H_{\text{ALI}} = \frac{d}{\Delta_{\text{vap}}} \frac{\mu_0}{T_{\text{vap}}}$$

$$\frac{2\pi}{\lambda_0} \vec{j} \cdot \vec{E} + \operatorname{div} \left(\frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_{\text{vap}}^{\text{vap}}} \right) = 0$$

$$\Delta_{\text{vap}} = \frac{130,7 \cdot \text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}}{\sum_i \nu_i \Delta_{\text{f}} H_i^{\circ}}$$

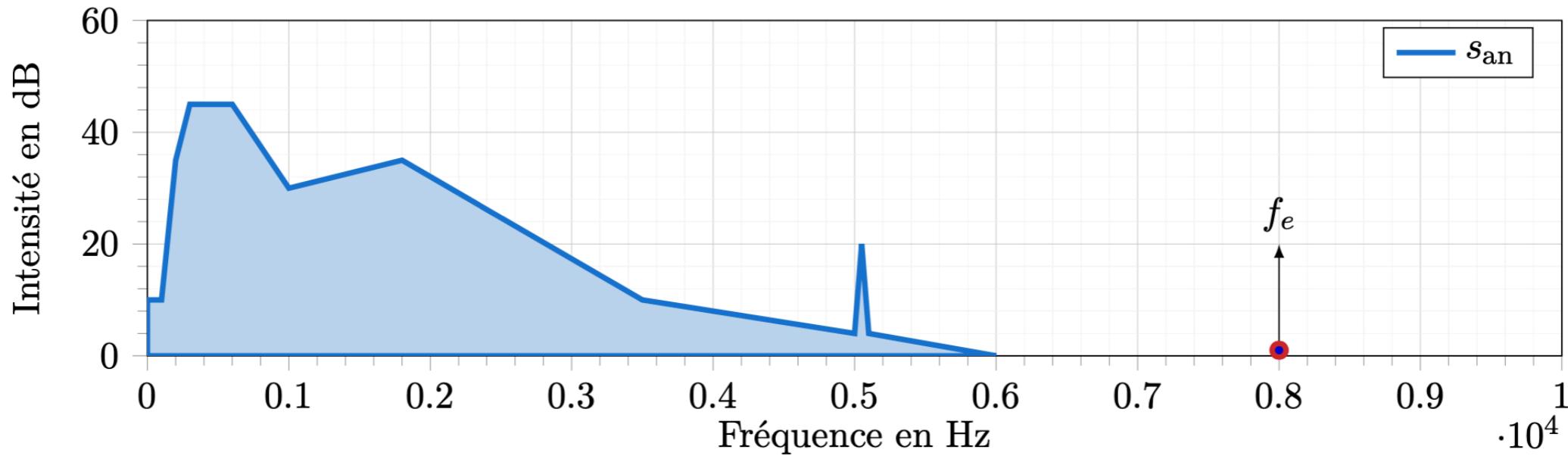
$$\vec{j} = \gamma \vec{E}$$

$$\Delta_{\text{r}} G = \frac{\partial G}{\partial \xi} \Big|_{P,T} \frac{\partial G}{\partial T} \Big|_{P,T} \frac{\partial \vec{H}}{\partial \mu_0} \Big|_{P,T} \frac{\partial \vec{H}}{\partial \varepsilon_0} \Big|_{P,T} \frac{\partial \vec{H}}{\partial \omega} \Big|_{P,T}$$

$$- (|\eta_{\text{ox}}(i)| + |\eta_{\text{red}}(i)|) \mathcal{E} V_{ri}$$

EXERCICE D'APPLICATION 2

On donne le spectre d'un signal analogique susceptible de transiter par téléphone. Ce signal a été parasité par un bruit haute fréquence à 5 kHz. Le signal audio est échantillonné à la fréquence $f_e = 8,0$ kHz.



1. Tracer le spectre du signal échantillonné sur le même graphique. Commenter le résultat obtenu.
2. Comment pourrait-on se débarrasser du pic parasite qui apparaît dans le signal échantillonné et rendre le spectre du signal échantillonné plus proche de celui du signal analogique.

$$h|_e^{\infty} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \text{Cu}^{\text{N}^{+4}} \text{Ti}^{\text{N}^{+4}} \text{Zr}^{\text{N}^{+4}} \text{G}^{\text{N}^{+4}} \text{O}_{(s)} \pm \text{Zn}^{2+} \text{rot } E = \\ p \in \mathcal{H}(\mathbf{j}\omega) = d_{\sum_j b_j \mathcal{E}^{\text{N}^{+4}} \mathcal{E}^{\text{N}^{+4}}} \exp \frac{i}{\tau_0} \mathcal{P}_{\partial t}$$

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \vec{J} &= 0 \\ \partial \vec{E} \wedge \vec{B} + \operatorname{div} (\vec{E} \wedge \vec{B}) &= 0 \\ \frac{\lambda_0}{j = \gamma \vec{E}} (\vec{S} \vec{M})^{\circ} &= \varphi_0^{\circ} \Big|_{E_{\oplus}^{\circ} / E_{\ominus}^{\circ}} = \varphi_0^{\circ} \Big|_{E_{\oplus}^{\circ}} = \varphi_0^{\circ} \Big|_{E_{\ominus}^{\circ}} \\ - (|\eta_{\text{ox}}(i)| + |\eta_{\text{red}}(i)|) E_{\vec{V}} \vec{v} &= \frac{Q_{\text{int}} H_{\text{ALI}}}{\varepsilon_0} = \frac{d \frac{\mu_0}{\Delta_{\text{vap}} s}}{\Delta_{\text{vap}} H^3 \text{exp}(\text{g})} \end{aligned}$$

DÉMARCHE RECOMMANDÉE D'ACQUISITION NUMÉRIQUE D'UN SIGNAL

Choix de la fréquence d'échantillonnage et analyse du spectre numérique

Pour acquérir et analyser un signal analogique on doit

- utiliser une fréquence d'échantillonnage telle que $f_e \geq 2f_{\text{an, max}}$;
 - filtrer le signal analogique avec un filtre passe-bas tel que $f_c \leq \frac{f_e}{2}$;
 - analyser ou utiliser uniquement la partie $f \in [0, \frac{f_e}{2}]$ du spectre numérique obtenu.

$$h|_e^{\circ} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \text{Cu}^{\text{Na}^{\pm} \mp \text{Zn}^{\pm} \text{Cl}^{\pm}}_{p \in \mathbb{Z}} \text{Et}_0^{\circ} \pm \text{Zn}^{\pm} \text{rot } E = \\ H(j\omega) = d \sum_k \frac{b_k^{\pm} \text{Et}_0^{\circ}}{\sum_j \frac{\Delta E}{f_j}} \exp \left(\frac{j\omega}{\tau} \right)$$

QUANTIFICATION

Tension de plein échelle

On appelle *tension de pleine échelle* d'un CAN, notée V_{PE} , l'écart entre la tension minimale et maximale mesurable par la carte d'acquisition.

Résolution d'une carte d'acquisition

On appelle *résolution d'une carte d'acquisition*, exprimée en bits, le nombre de valeurs mesurables dans la gamme offerte par la tension de pleine échelle V_{PE} de la carte.

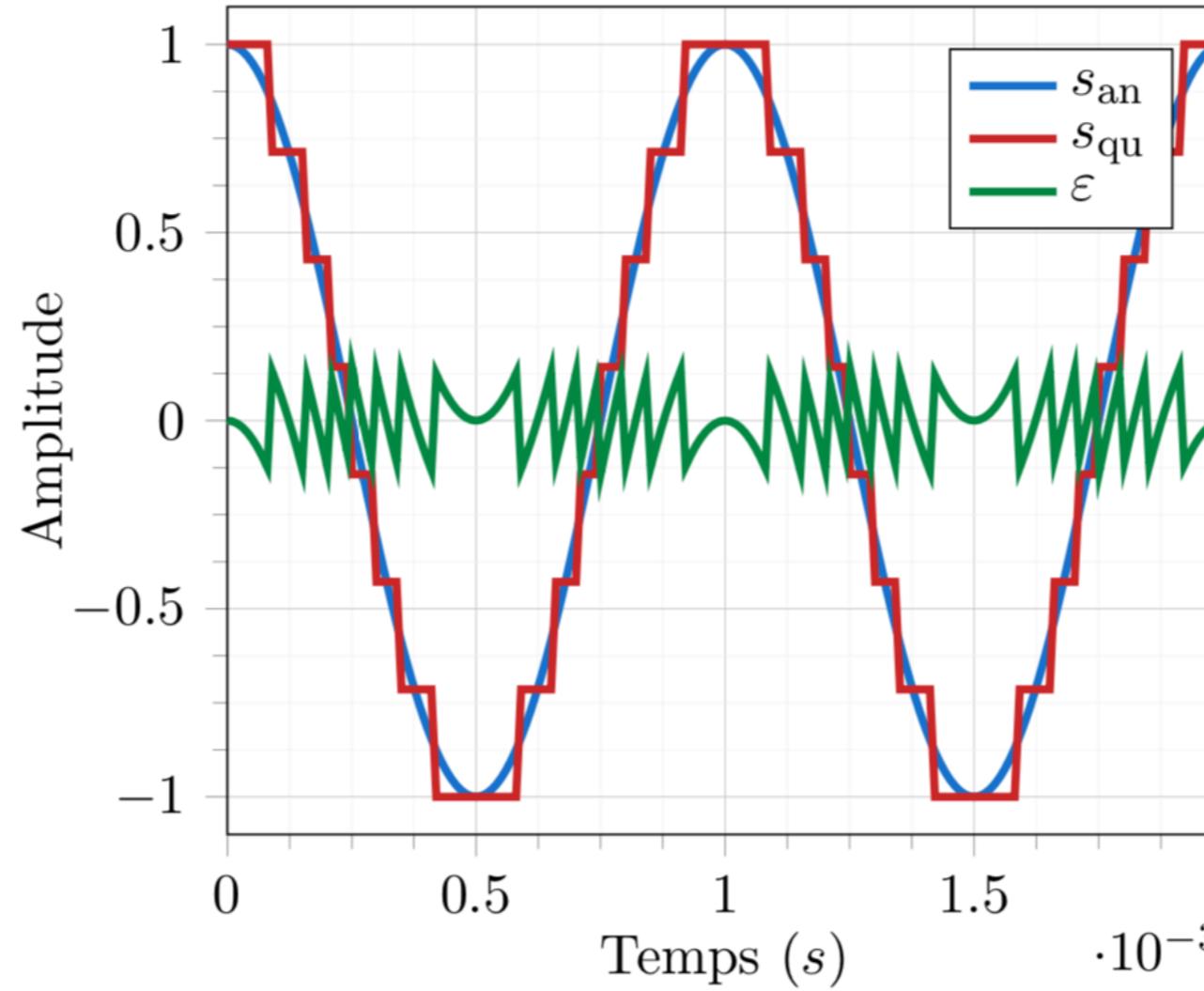
La précision associée est appelée *quantum* de mesure, ou Least Significant Bit :

$$q = \frac{V_{\text{PE}}}{2^N}$$

$$\tilde{h}_e^{\text{na}} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \text{Cu}^{\text{na}} \text{na}^{\text{na}} \tilde{H}_{(s)}^{\text{na}} \tilde{C}_{\mathcal{B}(s)}^{\text{na}} \pm \tilde{Z}_{\mathcal{B}}^{\text{na}} \tilde{k}^{\text{na}} \text{rot } E =$$

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \vec{j} &= 0 & \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} &= \frac{Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0} H_{\text{ALI}} = d \frac{\mu_0}{\Delta_{\text{vap}} S} = \frac{\mu_0}{T_{\text{vap}}} \\ \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \cdot \vec{j} &= 0 & \operatorname{div} \left(\frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_{\text{vap}}^{\text{S}}} \right) &= 0 \\ \frac{\partial \vec{S}}{\partial t} \cdot \vec{M}^{\text{vap}} &= \varphi_0^{\text{vap}} (E_{\text{vap}}^{\text{S}} - \mu_{\text{vap}}^{\text{S}}) & \Delta_{\text{vap}} S &= 130,7 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1} \\ \vec{j} &= \gamma \vec{E} & \Delta_{\text{vap}} H^{\circ} &= \sum_i \nu_i \Delta_{\text{f}} H_i^{\circ} \\ \Delta_{\text{vap}} G &= \frac{\partial G}{\partial \vec{E}} \frac{\partial \vec{E}}{\partial \vec{S}} \frac{\partial \vec{S}}{\partial t} \vec{M}^{\text{vap}} & \Delta_{\text{vap}} H^{\circ} &= \frac{\partial H^{\circ}}{\partial \vec{E}} \frac{\partial \vec{E}}{\partial \vec{S}} \frac{\partial \vec{S}}{\partial t} \vec{M}^{\text{vap}} \\ - (|\eta_{\text{ox}}(i)| + |\eta_{\text{red}}(i)|) \mathcal{E} V_{ri} & & \end{aligned}$$

ERREUR DE QUANTIFICATION



Erreur de quantification due à une carte d'acquisition à 3 bits, utilisée sur la pleine échelle

$$h_e^{\text{na}} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \text{Cu}^{\text{na}} \text{Fe}^{\text{na}} \text{Zn}^{\text{na}} \text{Co}^{\text{na}} \text{Ni}^{\text{na}} \text{Mn}^{\text{na}} \text{rot} E =$$

$$\vec{H}(\mathbf{j}\omega) = d \frac{\sum_k b_k^{\text{na}}}{\sum_j K_j^{\text{na}}} \exp \frac{\text{na}}{\partial \lambda}$$

$$\operatorname{div} \vec{j} = 0$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0} H_{\text{ALI}} = \frac{d}{\Delta_{\text{vap}}} \frac{\mu_0}{T_{\text{vap}}}$$

$$\frac{2\pi}{\lambda_0} \vec{j} \cdot \vec{E} + \operatorname{div} \left(\frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_0^{\text{vap}}} \right) = 0$$

$$\Delta_{\text{vap}} = \frac{130,71 \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}}{\sum_i \nu_i \Delta_{\text{f}} H_i^{\circ}}$$

$$\vec{j} = \gamma \vec{E}$$

$$\Delta_{\text{r}} G = \frac{\partial G}{\partial \xi} \Big|_{P,T} \frac{\partial G}{\partial \mu_0} \Big|_{P,T} \frac{\partial G}{\partial \omega} \Big|_{P,T} H^{\circ} \mu_0 \varepsilon_0 \vec{F}$$

$$- (|\eta_{\text{ox}}(i)| + |\eta_{\text{red}}(i)|) \mathcal{E} V_{ri}$$

FILTRAGE NUMÉRIQUE

```

def filtre_PB(s_num, f_c):
    Na=len(s_num) # on récupère le nombre de points d'échantillonnage
    s_filtre=[i for i in s_num] # on initialise la fonction filtre
    delta_t=Tmax/(Na-1) # on calcule le pas de temps
    for i in range(Na-1) :
        s_filtre[i+1]=s_filtre[i]+2*np.pi*f_c*delta_t*(s_num[i]-s_filtre[i])
    return s_filtre

```

Code python pour réaliser un filtrage numérique passe-bas

