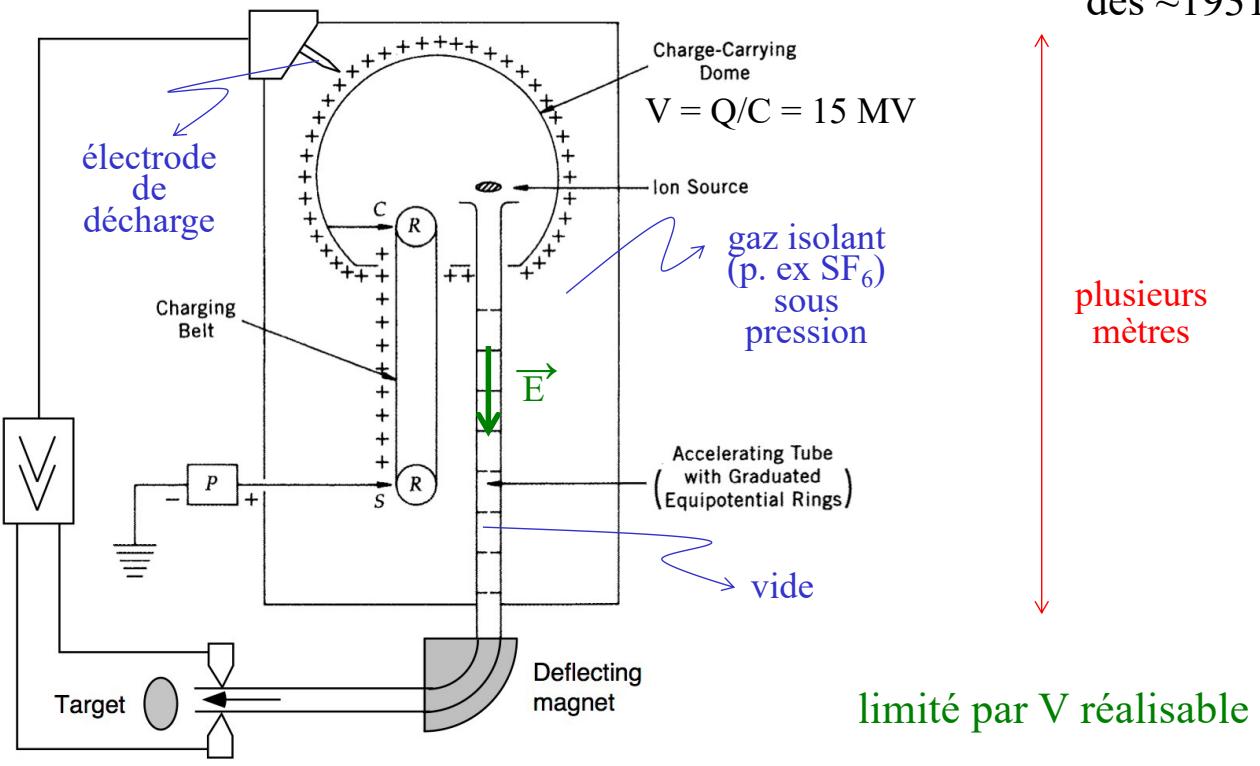


Accélérateur de Van de Graaff

dès ~1931

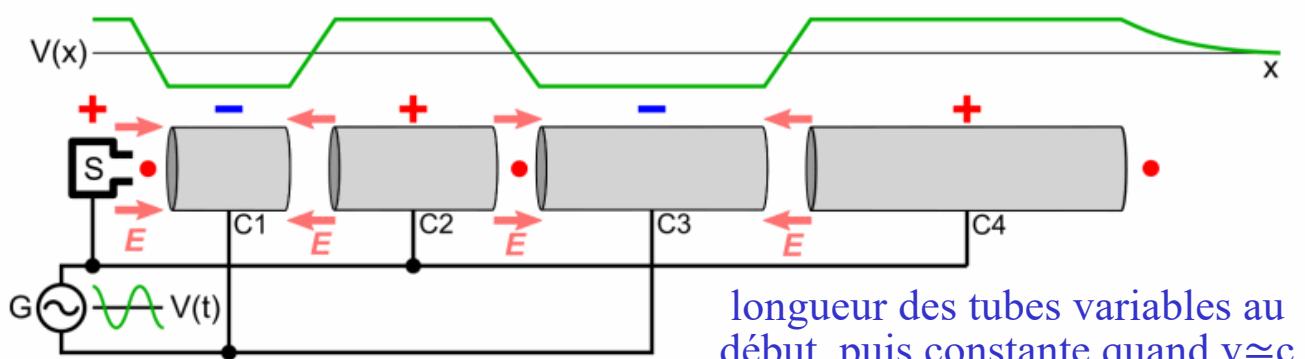


limité par V réalisable

$$E_{\text{cin}} = \int \vec{F} \cdot d\vec{\ell} = F\ell = qE\ell = qV \cong 15 \text{ MeV}$$

Accélérateur linéaire (LINAC)

n différences de potentiel V successives: $E_{\text{cin}} = n qV$



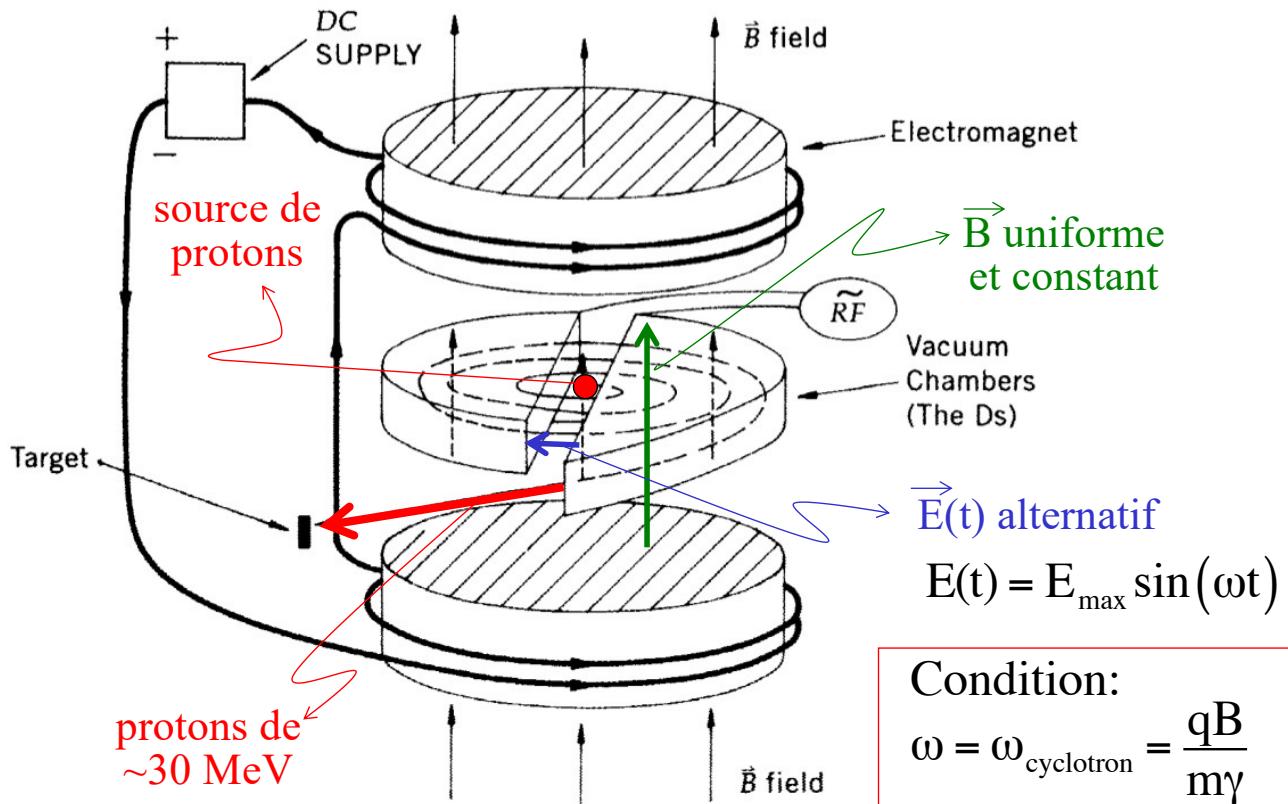
Le plus long LINAC est à SLAC (Stanford National Accelerator Lab)

- longueur = 3.2 km
- n ≈ 100'000
- E_{cin} e⁻ ≈ 50 GeV



Cyclotron

(Lawrence, ~1930)



OS, 9 avril 2025

108

Cyclotron (suite)

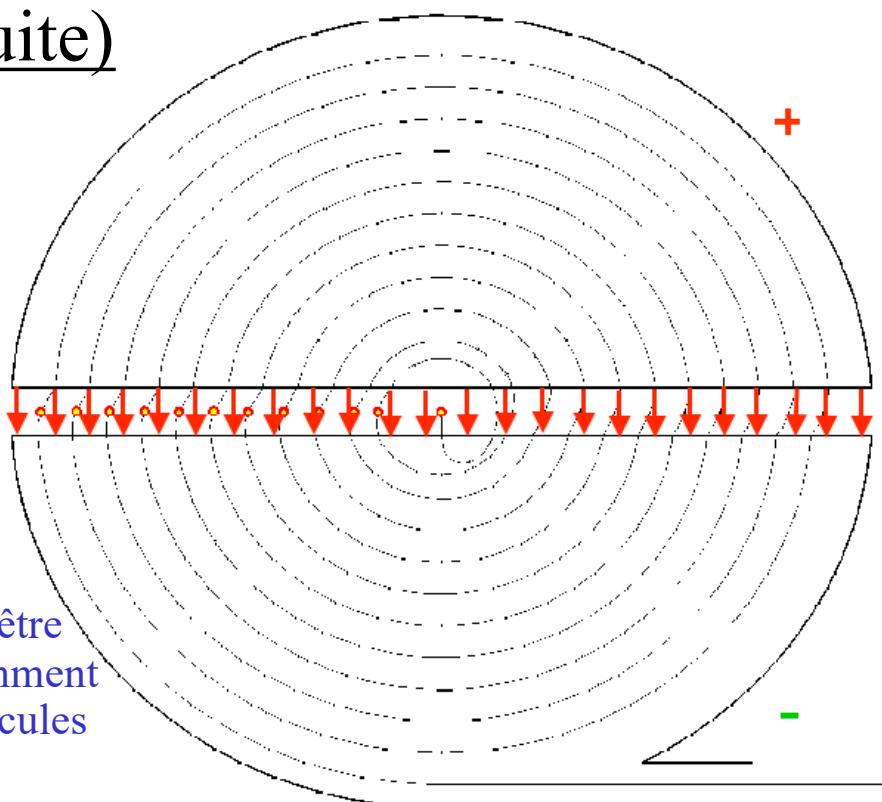
$$\gamma = \frac{E}{mc^2} = 1 + \frac{E_{\text{cin}}}{mc^2}$$

Si $E_{\text{cin}} \ll mc^2$, alors $\gamma \approx 1$ et

$$\omega_{\text{cyclotron}} = \frac{qB}{m}$$

→ condition sur ω peut être satisfaite indépendamment de l'énergie des particules accélérées

→ le cyclotron peut fonctionner "en continu"



Limitation: $E_{\text{cin}} \leq 30 \text{ MeV}$ pour des protons
pas possible pour des électrons

OS, 9 avril 2025

109

Synchrocyclotron (= cyclotron relativiste)

- Lorsque $\gamma > 1$, deux solutions pour garder la synchronisation, c'est-à-dire $\omega = \omega_{\text{cyclotron}}$

$$\omega_{\text{cycl}} = \frac{qB}{m\gamma}$$

- ① on diminue ω au cours de l'accélération avec champ B uniforme
 - synchronisation possible seulement pour les particules de même γ
 - accélération d'un paquet de particules à la fois → baisse d'intensité
- ② on garde ω constant au cours de l'accélération, mais on utilise un champ B non-uniforme
 - $B(r)$ croissant avec r

Premier accélérateur du CERN (1957–1990)

- diamètre orbite en fin d'accélération = 227 cm
- $E_{\text{cin}} = 600 \text{ MeV}$

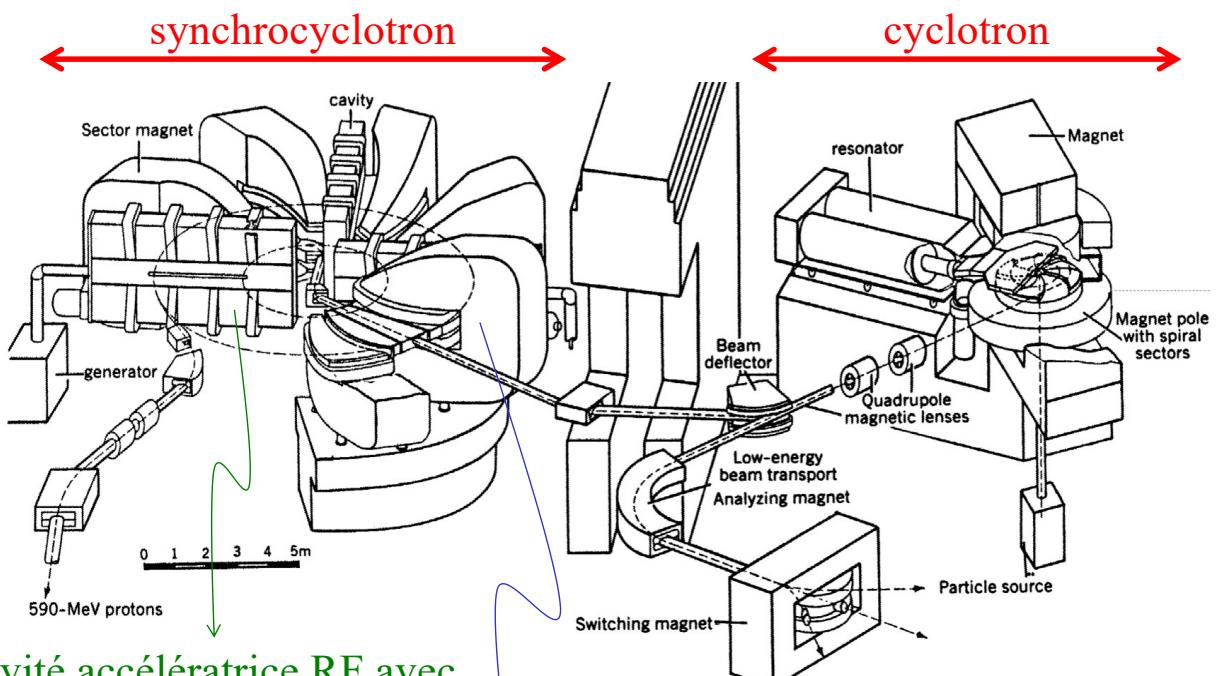


110

OS, 9 avril 2025

Synchrocyclotron du PSI

Paul Scherrer Institute,
Villigen, Suisse



cavité accélératrice RF avec E alternatif et ω constant

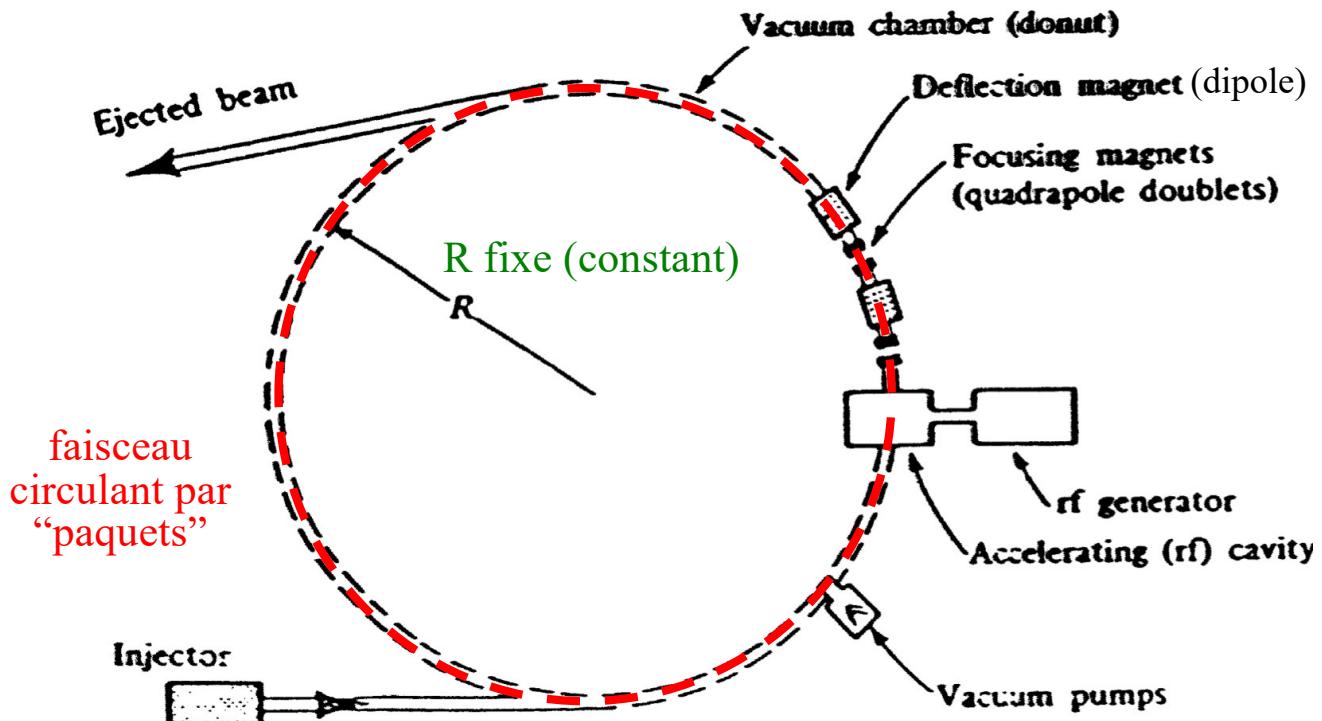
aimant avec B constant et non-uniforme pour garantir la synchronisation

OS, 9 avril 2025

111

Synchrotron

(1945, McMillan, Veksler)



Synchrotron

- Rayon des orbites = $R = \text{constante}$
- Deux conditions à satisfaire simultanément

$$\omega_{RF} = n \frac{pc^2}{RE} \quad n \text{ entier}$$

$$B = \frac{p}{qR}$$

$\Rightarrow \omega_{RF}, B \neq \text{constante au cours de l'accélération}$

Mais quand $\beta = \frac{pc}{E} \approx 1 \Rightarrow \omega_{RF} = \text{constante}$

Limitations techniques pour B et ω_{RF}
 \Rightarrow injection de particules pré-accelérées
 (LINAC ou synchrotron plus petit)

Synchrotrons

Date	Synchrotron	Particules	Energie faisceau (GeV)
1989–1995	LEP (CERN)	e^-, e^+	~ 46
1996–2000	LEP (CERN)	e^-, e^+	< 104.5
1986–1996	Tevatron (FNAL)	p, \bar{p}	900
2001–2011	Tevatron (FNAL)	p, \bar{p}	980
2009	LHC (CERN)	p	450
2010	LHC (CERN)	p	3500
2011–2012	LHC (CERN)	p	4000
2015–2018	LHC (CERN)	p	6500
2022–2026	LHC (CERN)	p	6800
2030–2041	LHC (CERN)	p	7000

- Si on veut E plus grand, il faut augmenter R, car
 - pour les protons: on ne peut pas créer un champ B arbitrairement élevé
 - pour les électrons: trop de perte d'énergie par rayonnement synchrotron

Rayonnement synchrotron

- Rayonnement émis par une particule accélérée (déviée)
- Perte d'énergie après 1 tour

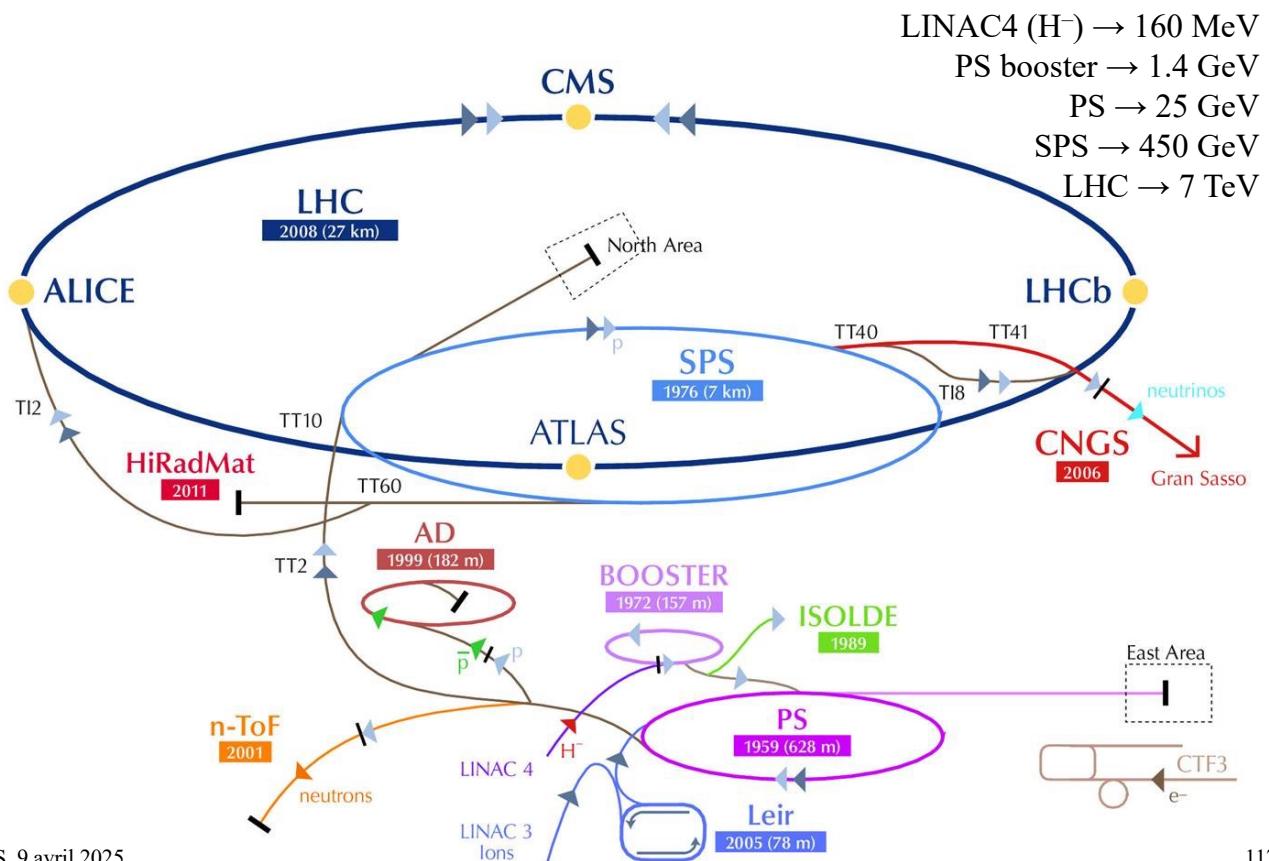
$$\Delta E = -\frac{4\pi\alpha\hbar c}{3R} \beta^3 \gamma^4 \quad \beta \approx 1, \quad \gamma = \frac{E}{mc^2}$$

- Effet 10^{13} fois plus grand pour les électrons que pour les protons
 - électrons de 20 GeV au LEP: $\Delta E = -3$ MeV/tour
 - électrons de 100 GeV au LEP: $\Delta E = -2$ GeV/tour
- Idée “récente”:
 - accélérer des muons à la place des électrons
 - permettrait d'avoir des leptons de très haute énergie (~ 1 TeV)
 - difficile technologiquement, peut-être dans 20 ans (?)

Accélérateurs circulaires

	Champ magnétique B	Fréquence accélératrice $v_{RF} = n \omega / (2\pi)$ $\omega = qB / (m\gamma) = v/R$	Rayon orbite $R = p / (qB)$	Energie cinétique maximale pour des protons	
Cyclotron	constant uniforme	\approx constant si $v \ll c$	$n=1$	variable	30 MeV
Synchrocyclotron	constant uniforme	variable	$n=1$	variable	1 GeV
	constant non-uniforme	constant	$n=1$		
Synchrotron	variable	variable → constant si $v \approx c$	$n \gg 1$	constant	7 TeV ou plus

Complexe des accélérateurs du CERN



Stabilité des faisceaux

- Les particules accélérées ne suivent pas l'orbite idéale
 - divergence à l'injection
 - asymétrie des champs
 - alignement imparfait des aimants
 - ...
- Les paquets de particules ont tendance à s'étaler

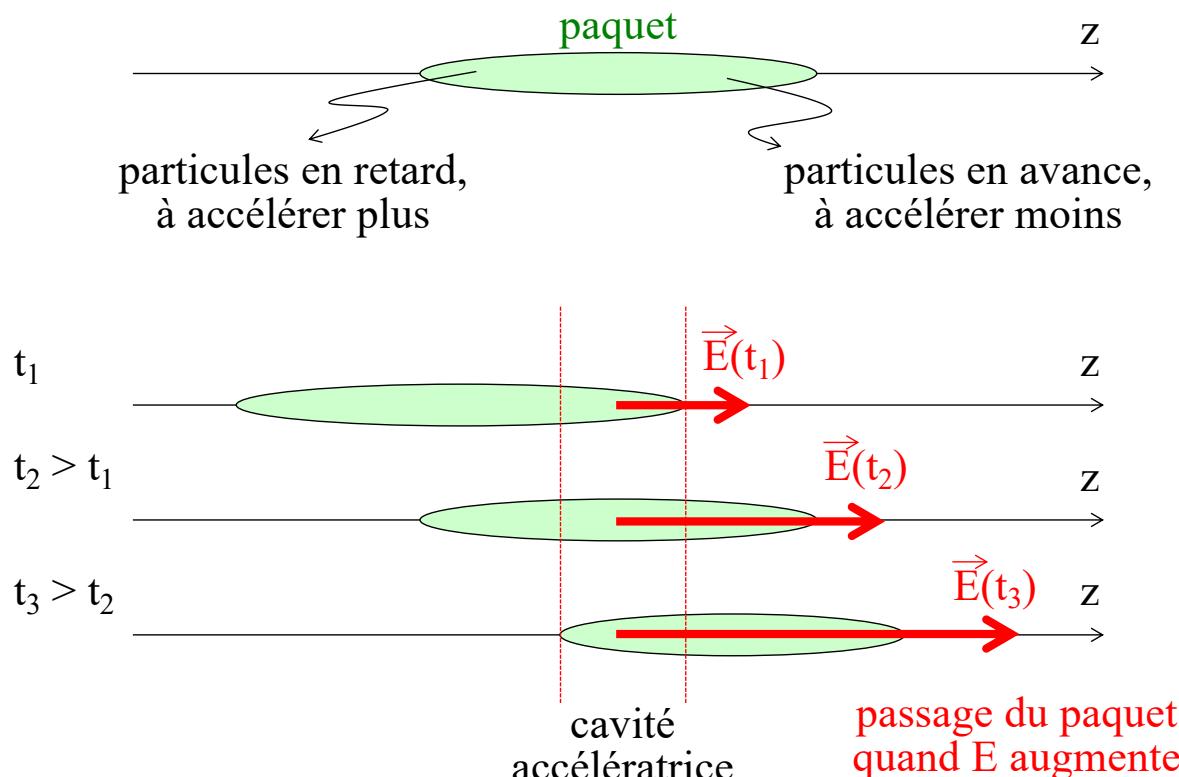
⇒ il faut une force de rappel transversale pour garantir la stabilité de l'orbite

- **oscillation bétatron** (voir exercice)

⇒ il faut une force de rappel longitudinale pour garder les paquets groupés

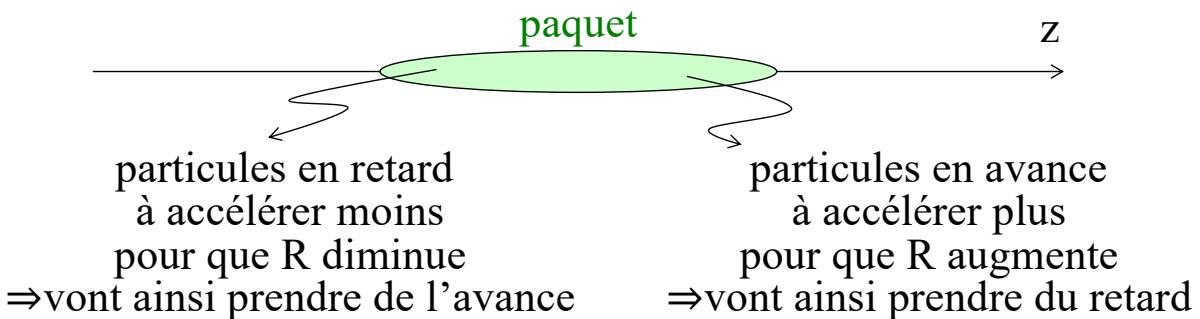
- **oscillation synchrotron**

Oscillations synchrotron (cas $\beta \ll 1$)



Oscillations synchrotron (cas $\beta \approx 1$)

toutes les particules ont la même vitesse



passage du paquet
quand E diminue

- Energie de transition (entre régimes $\beta \ll 1$ et $\beta \approx 1$)
- ω_{RF} grand (n grand), pour mieux localiser les paquets

Luminosité

- Nombre d'événements d'un certain type par unité de temps:
$$N = \sigma L$$
 - σ = section efficace [cm^2] pour le type d'événement considéré
 - L = luminosité [$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$]

- Luminosité pour un collisionneur:

$$L = f n_{\text{paquets}} \frac{N_+ N_-}{A}$$

- f = fréquence de circulation [s^{-1}]
- n_{paquets} = nombre de paquets “+” = nombre de paquets “-”
- N_{\pm} = nombre de particules par paquet “ \pm ”
- A = section des paquets au point de collision [cm^2]

