

Relâchement temporel et économie d'énergie

Un problème d'allocation des ressources

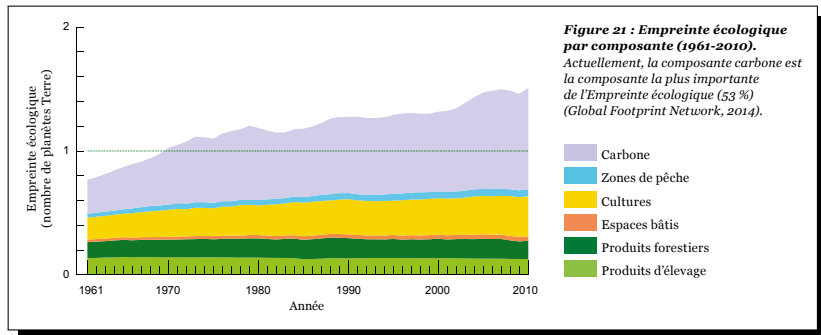
Jean-Yves Baudais

Institut d'électronique et de télécommunication de Rennes

GdR-ISIS, 6 mai 2015

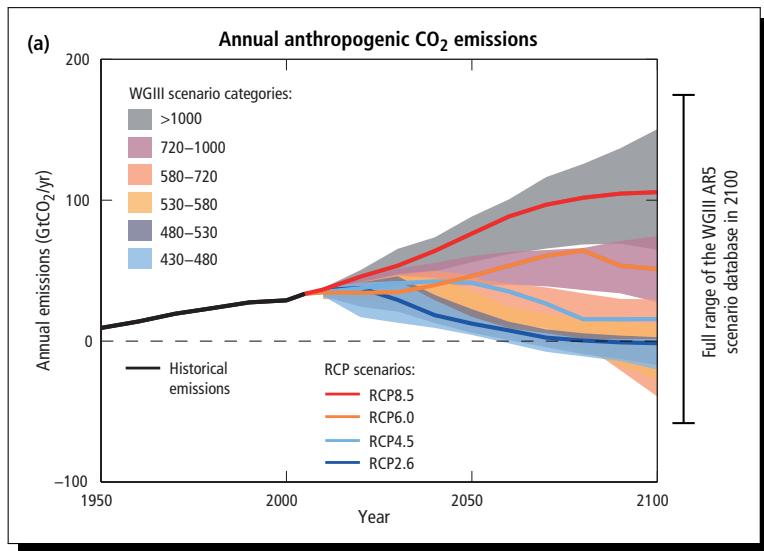


La vie : un processus instable ?



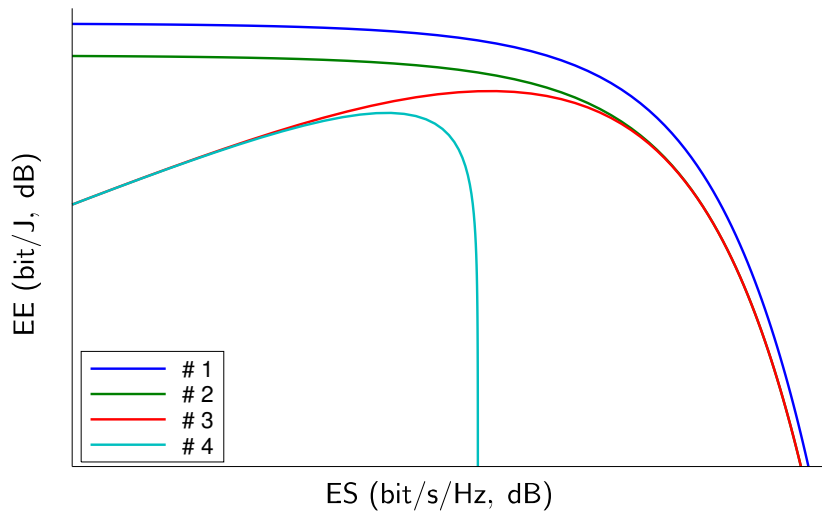
In Planète vivante, WWF, 2014

La vie : un processus instable ?



In Climate change 2014: Synthesis report, IPCC, Geneva

Efficacités énergétique et spectrale



Quelles limites ?

- ▶ Shannon-Hartley (transmission)

$$P_{\text{RF}}^0 = (2^{\frac{C}{B}} - 1)kT^\circ B \xrightarrow{B \rightarrow \infty} CkT^\circ \ln 2$$

- ▶ Shannon-von Neumann-Landauer (traitement)

$$E_{\text{BB}}^0 = kT^\circ \ln 2 = 2,8 \cdot 10^{-21} \text{ J/bit}$$

L. Gammaitoni, « Computing with uncertainty can help lowering the minimum energy required? », *Nanoenergy Letters*, p. 10–11, février 2013

- ▶ Consommation

$$P_0 = P_{\text{RF}}^0 + CE_{\text{BB}}^0 \xrightarrow{C \rightarrow 0} 0$$

- ▶ Aujourd'hui

- ▶ 0,25 pJ/bit $\rightsquigarrow P_{\text{BB}}$, $\eta_{\text{BB}} \propto 10^{-8}$ (GFLOPS/W)
- ▶ Macro-femtocell $\eta_{\text{RF}} \propto 10^{-17} \sim 10^{-13}$ (EARTH, GreenTouch)
- ▶ PLC (Zimmermann, 140 $\mu\text{J}/\text{Mbit}$) $\eta_{\text{RF}} \propto 10^{-11}$

X. Yu, H. Rashtian, S. Mirabbasi, P. Pande et D. Heo, « An 18.7 Gb/s 60 GHz OOK demodulator in 65-nm CMOS for wireless network-on-chip », *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 62, p. 799–806, mars 2015

Quelles limites ?

- ▶ Shannon-Hartley (transmission)

$$P_{\text{RF}}^0 = (2^{\frac{C}{B}} - 1)kT^\circ B \xrightarrow{B \rightarrow \infty} CkT^\circ \ln 2$$

- ▶ Shannon-von Neumann-Landauer (traitement)

$$E_{\text{BB}}^0 = kT^\circ \ln 2 = 2,8 \cdot 10^{-21} \text{ J/bit}$$

L. Gammaitoni, « Computing with uncertainty can help lowering the minimum energy required? », *Nanoenergy Letters*, p. 10–11, février 2013

- ▶ Consommation

$$P = \eta_{\text{RF}}^{-1} P_{\text{RF}}^0 + \eta_{\text{BB}}^{-1} C E_{\text{BB}}^0 \xrightarrow{C \rightarrow 0} 0$$

- ▶ Aujourd'hui

- ▶ 0,25 pJ/bit $\rightsquigarrow P_{\text{BB}}$, $\eta_{\text{BB}} \propto 10^{-8}$ (GFLOPS/W)
- ▶ Macro-femtocell $\eta_{\text{RF}} \propto 10^{-17} \sim 10^{-13}$ (EARTH, GreenTouch)
- ▶ PLC (Zimmermann, 140 $\mu\text{J}/\text{Mbit}$) $\eta_{\text{RF}} \propto 10^{-11}$

X. Yu, H. Rashtian, S. Mirabbasi, P. Pande et D. Heo, « An 18.7 Gb/s 60 GHz OOK demodulator in 65-nm CMOS for wireless network-on-chip », *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 62, p. 799–806, mars 2015

Modèle

- ▶ n canaux parallèles indépendants
- ▶ Relation émission-réception (modèle discret à bande étroite)

$$\forall i \in [1, n], \quad y_i = h_i x_i + w_i$$

- ▶ Transmission de Q bits

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i = \sum_{i=1}^n C_i B_i T_i$$

- ▶ Énergie requise (régime asymptotique, Q)

$$E = \sum_{i=1}^n \left(2^{\frac{Q_i}{B_i T_i}} - 1 \right) \frac{B_i T_i}{\gamma_i}, \quad \gamma_i = \frac{|h_i|^2}{N_i}$$

- ▶ Capacité de focalisation, rendement ampli RF $|h_j|^2$
- ▶ Technologie (électronique) et environnement : N_j
- ▶ Régulation, standardisation : $B_j, \sum_i B_j$

Modèle

- ▶ n canaux parallèles indépendants
- ▶ Relation émission-réception (modèle discret à bande étroite)

$$\forall i \in [1, n], \quad y_i = h_i x_i + w_i$$

- ▶ Transmission de Q bits

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i = \sum_{i=1}^n C_i B_i T_i$$

- ▶ Énergie requise (régime asymptotique, Q)

$$E = \sum_{i=1}^n \left(2^{\frac{Q_i}{B_i T_i}} - 1 \right) \frac{B_i T_i}{\gamma_i}, \quad \gamma_i = \frac{|h_i|^2}{N_i}$$

- ▶ Capacité de focalisation, rendement ampli RF $|h_i|^2$
- ▶ Technologie (électronique) et environnement : N_i
- ▶ Régulation, standardisation : $B_i, \sum_i B_i$

Modèle

- ▶ n canaux parallèles indépendants
- ▶ Relation émission-réception (modèle discret à bande étroite)

$$\forall i \in [1, n], \quad y_i = h_i x_i + w_i$$

- ▶ Transmission de Q bits

OBJECTIF

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i = \sum_{i=1}^n C_i B_i T_i$$

- ▶ Énergie requise (régime asymptotique, Q)

$$E = \sum_{i=1}^n \left(2^{\frac{Q_i}{B_i T_i}} - 1 \right) \frac{B_i T_i}{\gamma_i}, \quad \gamma_i = \frac{|h_i|^2}{N_i}$$

- ▶ Capacité de focalisation, rendement ampli RF $|h_i|^2$
- ▶ Technologie (électronique) et environnement : N_i
- ▶ Régulation, standardisation : $B_i, \sum_i B_i$

PARAM.
PARAM.
PARAM.

Quelle efficacité ?

- ▶ Limite énergétique

$$E_0 = \min_{\substack{\forall i, B_i T_i \rightarrow \infty \\ \sum_i Q_i = Q}} E = \frac{Q \ln 2}{\max_i \gamma_i}, \quad \forall B_i$$

- ▶ Facteur d'efficacité énergétique $\in [0, 1]$

$$\beta = \frac{E_0}{E} = \left(\sum_i \left(2^{\frac{Q_i}{B_i T_i}} - 1 \right) B_i T_i \frac{\max_j \gamma_j}{\gamma_i} \right)^{-1} Q \ln 2$$

Système efficace $\beta = 1$

- ▶ Efficacité énergétique

$$\eta_{EE} = \frac{Q}{E} = \left(\sum_i \left(2^{\frac{Q_i}{B_i T_i}} - 1 \right) B_i T_i \frac{1}{\gamma_i} \right)^{-1} Q$$

- ▶ Nouveaux éco-services sans contrainte temporelle

Quelle efficacité ?

- ▶ Limite énergétique

$$E_0 = \min_{\substack{\forall i, B_i T_i \rightarrow \infty \\ \sum_i Q_i = Q}} E = \frac{Q \ln 2}{\max_i \gamma_i}, \quad \forall B_i$$

- ▶ Facteur d'efficacité énergétique $\in [0, 1]$

$$\beta = \frac{E_0}{E} = \left(\sum_i \left(2^{\frac{Q_i}{B_i T_i}} - 1 \right) B_i T_i \frac{\max_j \gamma_j}{\gamma_i} \right)^{-1} Q \ln 2$$

Système efficace $\beta = 1$

- ▶ Efficacité énergétique

$$\eta_{EE} = \frac{Q}{E} = \left(\sum_i \left(2^{\frac{Q_i}{B_i T_i}} - 1 \right) B_i T_i \frac{1}{\gamma_i} \right)^{-1} Q$$

- ▶ Nouveaux éco-services sans contrainte temporelle

Quelle efficacité ?

- ▶ Limite énergétique

$$E_0 = \min_{\substack{\forall i, B_i T_i \rightarrow \infty \\ \sum_i Q_i = Q}} E = \frac{Q \ln 2}{\max_i \gamma_i}, \quad \forall B_i$$

- ▶ Facteur d'efficacité énergétique $\in [0, 1]$

$$\beta = \frac{E_0}{E} = \left(\sum_i \left(2^{\frac{Q_i}{B_i T_i}} - 1 \right) B_i T_i \frac{\max_j \gamma_j}{\gamma_i} \right)^{-1} Q \ln 2$$

Système efficace $\beta = 1$

- ▶ Efficacité énergétique

$$\eta_{EE} = \frac{Q}{E} = \left(\sum_i \left(2^{\frac{Q_i}{B_i T_i}} - 1 \right) B_i T_i \frac{1}{\gamma_i} \right)^{-1} Q$$

- ▶ Nouveaux éco-services sans contrainte temporelle

Quelle efficacité ?

- ▶ Limite énergétique

$$E_0 = \min_{\substack{\forall i, B_i T_i \rightarrow \infty \\ \sum_i Q_i = Q}} E = \frac{Q \ln 2}{\max_i \gamma_i}, \quad \forall B_i$$

- ▶ Facteur d'efficacité énergétique $\in [0, 1]$ CONTRAINTE

$$\beta = \frac{E_0}{E} = \left(\sum_i \left(2^{\frac{Q_i}{B_i T_i}} - 1 \right) B_i T_i \frac{\max_j \gamma_j}{\gamma_i} \right)^{-1} Q \ln 2$$

Système efficace $\beta = 1$

- ▶ Efficacité énergétique

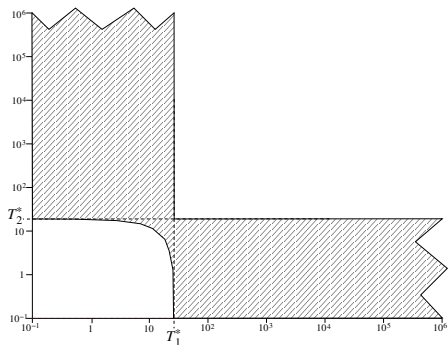
$$\eta_{EE} = \frac{Q}{E} = \left(\sum_i \left(2^{\frac{Q_i}{B_i T_i}} - 1 \right) B_i T_i \frac{1}{\gamma_i} \right)^{-1} Q$$

- ▶ Nouveaux éco-services sans contrainte temporelle

Problème et solution

- Trouver $\{Q_i, T_i\}_{i \in [1, n]}$ tels que
- $$\left\{ \begin{array}{l} \sum_i E_i = \frac{E_0}{\beta} \\ \sum_i Q_i = Q \\ \forall i, Q_i \geq 0 \\ \forall i, T_i \geq 0 \\ \forall i, E_i \geq 0 \end{array} \right. \quad (a)$$

- $n = 2$
- β atteignable sur les deux canaux
- $\{T_1, T_2\}$



Optimisation

- ▶ Temps de transmission $T_M = \max_i T_i$
- ▶ Minimiser T_M sous contraintes (a)
- ▶ Solution
 - ▶ Analytique
 - ▶ Type *water-filling* : $Q_i = 0$ si $\lambda\gamma_i \leq 1$
 - ▶ $\forall i \in \mathcal{I}, T_i = T_M^*$
 - ▶ $\forall B_i$

- ▶ Temps moyen d'occupation des canaux $T_S = \frac{1}{n} \sum_i T_i$
- ▶ Minimiser T_S sous contraintes (a)
- ▶ Solution
 - ▶ Trivial si $\forall i, B_i = B$: transmettre sur le meilleur canal
 - ▶ Pas de solution générale

- ▶ Application WiMAX et UWB (MB-OFDM) : gain de 30 dB en énergie pour seulement $\times 10$ en temps

Optimisation

- ▶ Temps de transmission $T_M = \max_i T_i$
- ▶ Minimiser T_M sous contraintes (a)
- ▶ Solution
 - ▶ Analytique
 - ▶ Type *water-filling* : $Q_i = 0$ si $\lambda\gamma_i \leq 1$
 - ▶ $\forall i \in \mathcal{I}, T_i = T_M^*$
 - ▶ $\forall B_i$

- ▶ Temps moyen d'occupation des canaux $T_S = \frac{1}{n} \sum_i T_i$
- ▶ Minimiser T_S sous contraintes (a)
- ▶ Solution
 - ▶ Trivial si $\forall i, B_i = B$: transmettre sur le meilleur canal
 - ▶ Pas de solution générale

- ▶ Application WiMAX et UWB (MB-OFDM) : gain de 30 dB en énergie pour seulement $\times 10$ en temps

Optimisation

- ▶ Temps de transmission $T_M = \max_i T_i$
- ▶ Minimiser T_M sous contraintes (a)
- ▶ Solution
 - ▶ Analytique
 - ▶ Type *water-filling* : $Q_i = 0$ si $\lambda\gamma_i \leq 1$
 - ▶ $\forall i \in \mathcal{I}, T_i = T_M^*$
 - ▶ $\forall B_i$

- ▶ Temps moyen d'occupation des canaux $T_S = \frac{1}{n} \sum_i T_i$
- ▶ Minimiser T_S sous contraintes (a)
- ▶ Solution
 - ▶ Trivial si $\forall i, B_i = B$: transmettre sur le meilleur canal
 - ▶ Pas de solution générale

- ▶ Application WiMAX et UWB (MB-OFDM) : gain de 30 dB en énergie pour seulement $\times 10$ en temps

Optimisation

- ▶ Temps de transmission $T_M = \max_i T_i$
- ▶ Minimiser T_M sous contraintes (a)
- ▶ Solution
 - ▶ Analytique
 - ▶ Type *water-filling* : $Q_i = 0$ si $\lambda\gamma_i \leq 1$
 - ▶ $\forall i \in \mathcal{I}, T_i = T_M^*$
 - ▶ $\forall B_i$

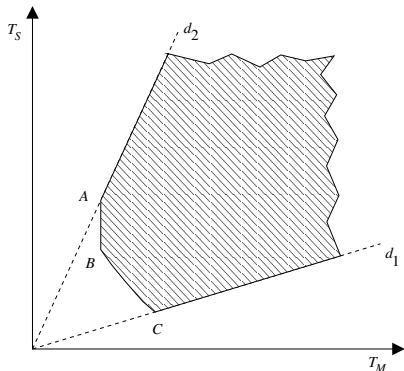
- ▶ Temps moyen d'occupation des canaux $T_S = \frac{1}{n} \sum_i T_i$
- ▶ Minimiser T_S sous contraintes (a)
- ▶ Solution
 - ▶ Trivial si $\forall i, B_i = B$: transmettre sur le meilleur canal
 - ▶ Pas de solution générale

- ▶ Application WiMAX et UWB (MB-OFDM) : gain de 30 dB en énergie pour seulement $\times 10$ en temps

Optimisation

- ▶ Compromis temps de transmission-temps d'occupation
- ▶ $\forall i, B_i = B$

- ▶ $T_M \geq T_M(B) = T_M^*$
- ▶ $T_S \geq T_S(C) = T_S^*$
- ▶ $nT_S \geq T_M \implies d_1$
- ▶ $T_S \leq T_M \implies d_2$
- ▶ $T_M(C) = nT_S(C)$
- ▶ $T_S(A) = T_M(A)$
- ▶ Front de Pareto BC
(expression analytique)



- ▶ $\widehat{BC} \ T_M \in [T_M^*, nT_S^*]$ et $\forall i, T_i \in \{0, \tilde{T}, T_M\} \wedge \exists ! j \ T_j = \tilde{T}$

Canaux LVT

- ▶ Variation de Rayleigh à l'échelle de la communication
- ▶ $\gamma \sim \chi^2(2)$ de moyenne $\bar{\gamma}$
- ▶ Capacité ergodique sans allocation de puissance ($P = \frac{E}{T}$, $B = 1$)

$$C = \int_0^{\infty} \log_2(1 + \gamma P) p(\gamma) d\gamma = \frac{e^{\frac{1}{\bar{\gamma}P}}}{\ln 2} E_1\left(\frac{1}{\bar{\gamma}P}\right)$$

W. Lee, « Estimate of channel capacity in rayleigh fading environment », *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 39, p. 187–189, août 1990

- ▶ Capacité ergodique avec allocation de puissance

$$C = \int_0^{\infty} \log_2\left(1 + \gamma P(\gamma)\right) p(\gamma) d\gamma = \frac{E_1\left(\frac{\gamma_0}{\bar{\gamma}}\right)}{\ln 2} = \frac{\bar{\gamma}}{\ln 2} \left(\frac{e^{-\frac{\gamma_0}{\bar{\gamma}}}}{\gamma_0} - P\right)$$

A. Goldsmith et P. Varaiya, « Capacity of fading channels with channel side information », *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 43, p. 1986–1992, novembre 1997

Canaux LVT

- ▶ Variation de Rayleigh à l'échelle de la communication
- ▶ $\gamma \sim \chi^2(2)$ de moyenne $\bar{\gamma}$
- ▶ Capacité ergodique sans allocation de puissance ($P = \frac{E}{T}$, $B = 1$)

$$C = \int_0^{\infty} \log_2(1 + \gamma P) p(\gamma) d\gamma = \frac{e^{\frac{1}{\bar{\gamma}P}}}{\ln 2} E_1\left(\frac{1}{\bar{\gamma}P}\right)$$

W. Lee, « Estimate of channel capacity in rayleigh fading environment », *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 39, p. 187–189, août 1990

- ▶ Capacité ergodique avec allocation de puissance

$$C = \int_0^{\infty} \log_2\left(1 + \gamma P(\gamma)\right) p(\gamma) d\gamma = \frac{E_1\left(\frac{\gamma_0}{\bar{\gamma}}\right)}{\ln 2} = \frac{\bar{\gamma}}{\ln 2} \left(\frac{e^{-\frac{\gamma_0}{\bar{\gamma}}}}{\gamma_0} - P \right)$$

A. Goldsmith et P. Varaiya, « Capacity of fading channels with channel side information », *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 43, p. 1986–1992, novembre 1997

Limite ergodique

- ▶ Transmission par bloc (modèle discret i.i.d, γ_i)

$$Q(n) = \sum_{i=1}^n BT_B \log_2 \left(1 + \frac{\gamma_i E_i(\gamma_i)}{BT_B} \right), \quad E(n) = \sum_{i=1}^n E_i(\gamma_i)$$

- ▶ Allocation de puissance

$$\begin{aligned} E^*(n) &= n \min_{\int Q_i(\gamma_i) p(\gamma_i) d\gamma_i = Q} \int_0^{\infty} E_i(\gamma_i) dP_{\gamma_i}(\gamma_i) \\ &= \frac{Q \ln 2}{\bar{\gamma}} \left(\left(E_1 \left(\frac{\gamma_0}{\bar{\gamma}} \right) e^{\frac{\gamma_0}{\bar{\gamma}}} \frac{\gamma_0}{\bar{\gamma}} \right)^{-1} - 1 \right) \end{aligned}$$

- ▶ Limité énergétique

$$E_0 = \lim_{n \rightarrow \infty} E^*(n) = \lim_{\gamma_0 \rightarrow \infty} E^*(n) = 0$$

- ▶ Limite asymptotiquement atteignable ?

- ▶ Transmission ssi $\gamma \geq \gamma_0 \implies E_{RX} \geq E_{TX}$
- ▶ Distribution à support bornée

G. Gradoni et L. Arnaut, « Minimum-value distribution of random electromagnetic fields for modeling deep fading in wireless communications », *Annales des télécommunications*, vol. 66, no. 7-8, p. 465–473, 2011

Limite ergodique

- ▶ Transmission par bloc (modèle discret i.i.d, γ_i)

$$Q(n) = \sum_{i=1}^n BT_B \log_2 \left(1 + \frac{\gamma_i E_i(\gamma_i)}{BT_B} \right), \quad E(n) = \sum_{i=1}^n E_i(\gamma_i)$$

- ▶ Allocation de puissance

$$\begin{aligned} E^*(n) &= n \min_{\int Q_i(\gamma_i) p(\gamma_i) d\gamma_i = Q} \int_0^{\infty} E_i(\gamma_i) dP_{\gamma_i}(\gamma_i) \\ &= \frac{Q \ln 2}{\bar{\gamma}} \left(\left(E_1 \left(\frac{\gamma_0}{\bar{\gamma}} \right) e^{\frac{\gamma_0}{\bar{\gamma}}} \frac{\gamma_0}{\bar{\gamma}} \right)^{-1} - 1 \right) \end{aligned}$$

- ▶ Limité énergétique

$$E_0 = \lim_{n \rightarrow \infty} E^*(n) = \lim_{\gamma_0 \rightarrow \infty} E^*(n) = 0$$

- ▶ Limite asymptotiquement atteignable ?

- ▶ Transmission ssi $\gamma \geq \gamma_0 \implies E_{RX} \geq E_{TX}$
- ▶ Distribution à support bornée

G. Gradoni et L. Arnaut, « Minimum-value distribution of random electromagnetic fields for modeling deep fading in wireless communications », *Annales des télécommunications*, vol. 66, no. 7-8, p. 465–473, 2011

Limite ergodique

- ▶ Transmission par bloc (modèle discret i.i.d, γ_i)

$$Q(n) = \sum_{i=1}^n BT_B \log_2 \left(1 + \frac{\gamma_i E_i(\gamma_i)}{BT_B} \right), \quad E(n) = \sum_{i=1}^n E_i(\gamma_i)$$

- ▶ Allocation de puissance

$$\begin{aligned} E^*(n) &= n \min_{\int Q_i(\gamma_i) p(\gamma_i) d\gamma_i = Q} \int_0^{\infty} E_i(\gamma_i) dP_{\gamma_i}(\gamma_i) \\ &= \frac{Q \ln 2}{\bar{\gamma}} \left(\left(E_1 \left(\frac{\gamma_0}{\bar{\gamma}} \right) e^{\frac{\gamma_0}{\bar{\gamma}}} \frac{\gamma_0}{\bar{\gamma}} \right)^{-1} - 1 \right) \end{aligned}$$

- ▶ Limité énergétique

$$E_0 = \lim_{n \rightarrow \infty} E^*(n) = \lim_{\gamma_0 \rightarrow \infty} E^*(n) = 0$$

- ▶ Limite asymptotiquement atteignable ?

- ▶ Transmission ssi $\gamma \geq \gamma_0 \implies E_{RX} \geq E_{TX}$
- ▶ Distribution à support bornée

G. Gradoni et L. Arnaut, « Minimum-value distribution of random electromagnetic fields for modeling deep fading in wireless communications », *Annales des télécommunications*, vol. 66, no. 7-8, p. 465–473, 2011

Limite ergodique

- ▶ Transmission par bloc (modèle discret i.i.d, γ_i)

$$Q(n) = \sum_{i=1}^n BT_B \log_2 \left(1 + \frac{\gamma_i E_i(\gamma_i)}{BT_B} \right), \quad E(n) = \sum_{i=1}^n E_i(\gamma_i)$$

- ▶ Allocation de puissance

$$\begin{aligned} E^*(n) &= n \min_{\int Q_i(\gamma_i) p(\gamma_i) d\gamma_i = Q} \int_0^\infty E_i(\gamma_i) dP_{\gamma_i}(\gamma_i) \\ &= \frac{Q \ln 2}{\bar{\gamma}} \left(\left(E_1 \left(\frac{\gamma_0}{\bar{\gamma}} \right) e^{\frac{\gamma_0}{\bar{\gamma}}} \frac{\gamma_0}{\bar{\gamma}} \right)^{-1} - 1 \right) \end{aligned}$$

- ▶ Limité énergétique

$$E_0 = \lim_{n \rightarrow \infty} E^*(n) = \lim_{\gamma_0 \rightarrow \infty} E^*(n) = 0$$

- ▶ Limite asymptotiquement atteignable ?

- ▶ Transmission ssi $\gamma \geq \gamma_0 \implies E_{RX} \geq E_{TX}$
- ▶ Distribution à support bornée

G. Gradoni et L. Arnaut, « Minimum-value distribution of random electromagnetic fields for modeling deep fading in wireless communications », *Annales des télécommunications*, vol. 66, no. 7-8, p. 465–473, 2011

Résultats ergodiques

- ▶ Problème

- ▶ Données $\bar{\gamma}$, B , T_B
- ▶ Contraintes Q , E
- ▶ Variable n

- ▶ Solution

$$\left\{ \begin{array}{l} n = \frac{Q \ln 2}{BT_B E_1\left(\frac{\gamma_0}{\bar{\gamma}}\right)} \\ E_1\left(\frac{\gamma_0}{\bar{\gamma}}\right) e^{\frac{\gamma_0}{\bar{\gamma}}} \frac{\gamma_0}{\bar{\gamma}} = \left(\frac{\bar{\gamma} E}{Q \ln 2} + 1\right)^{-1} \end{array} \right. \text{ et } \left\{ \begin{array}{l} E_i = \left[\frac{BT_B}{\gamma_0} - \frac{BT_B}{\gamma_i} \right]^+ \\ Q_i = BT_B \log_2 \left(1 + \frac{\gamma_i E_i}{BT_B} \right) \end{array} \right.$$

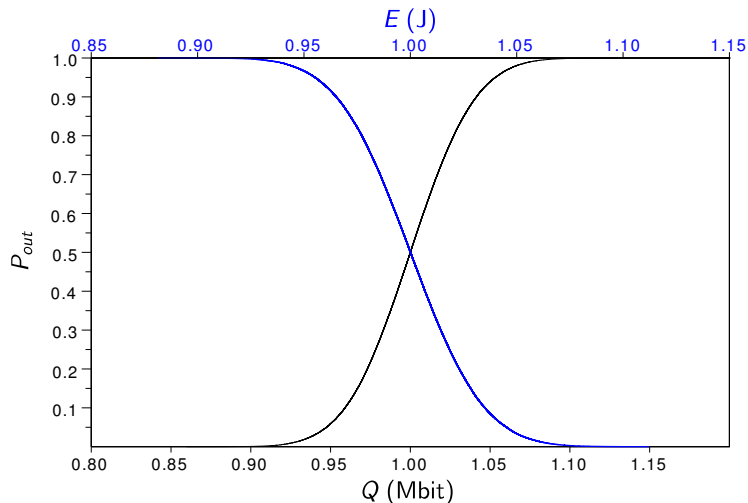
R. Berry et R. Gallager, « Communication over fading channels with delay constraints », *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 48, p. 1135–1149, mai 2002

- ▶ Extension non ergodique

- ▶ Probabilité de coupure
- ▶ ϵ -mesure

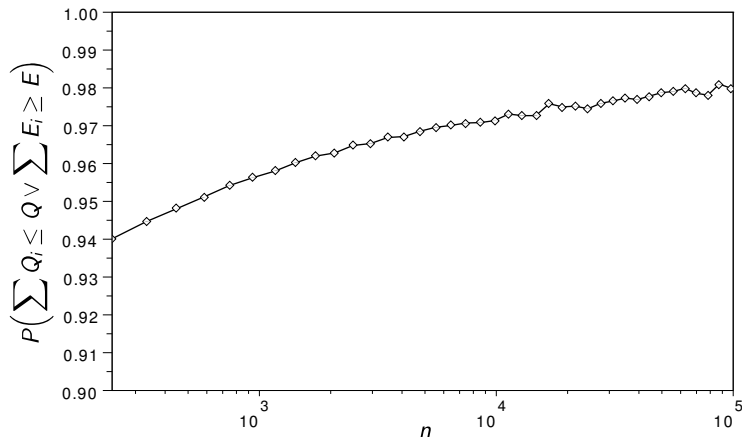
Extension non ergodique

- $\bar{\gamma} = 10^6$, $BT_B = 10^3$, $E = 1$, $Q = 10^6 \Rightarrow n = 939$, $\frac{\gamma_0}{\bar{\gamma}} \approx 0,38$



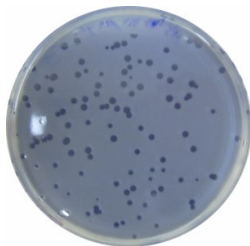
Extension non ergodique

- ▶ $\bar{\gamma} = 10^6$, $BT_B = 10^3$, $E = 1$, $Q \in [5 \cdot 10^5; 4,3 \cdot 10^6]$



L. Georgiadis, M. Neely et L. Tassiulas, « Resource allocation and cross-layer control in wireless networks », *Foundations and Trends in Networking*, vol. 1, no. 1, p. 1–144, 2006

Conclusion



Conclusion



Relâchement temporel et économie d'énergie

Un problème d'allocation des ressources

jean-yves.baudais@insa-rennes.fr

<http://www.ietr.fr>

GdR-ISIS, 6 mai 2015

