

Ce document est autorisé sous la Licence CC BY-NC-SA 4.0.

Pour obtenir une copie de cette License, veuillez consulter :

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Pour les document traduits, nous vous suggérons de donner credit à l'auteur(s) original(s) et au(x) traducteur(s).



Aperçu : introduction aux flux de covariance de turbulence

Marcy Litvak, Université du Nouveau Mexique, Albuquerque

Kim Novick, Université de l'Indiana, Bloomington

26 juillet 2022

Cours de flux de Niwot Ridge



Qu'est ce qu'un flux ?

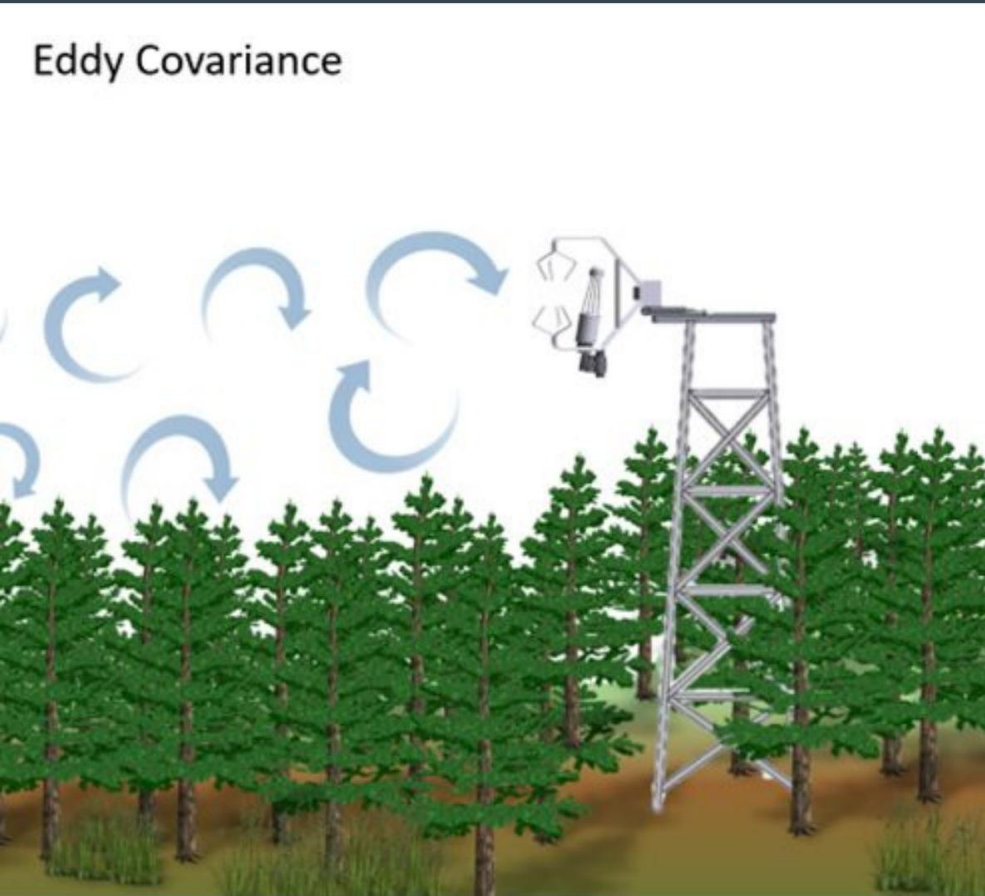
- Transport de matière (scalaire) exprimé par rapport à l'unité de surface et à l'unité temps
- A une direction et un signe
- Se concentrer sur le flux de surface (échange entre la surface et l'atmosphère au-dessus)
 - Dioxyde de carbone, méthane, COV, ozone, etc.
 - Chaleur, humidité, quantité de mouvement
- Flux de dioxyde de carbone = « flux de CO₂ » ou échange net de l'écosystème (NEE)
 - $\mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$ ou $\text{g C m}^2 \text{jour}^{-1}$
 - Positif (C ajouté à l'atmosphère) ou négatif (C retiré de l'atmosphère, ajouté à l'écosystème)
- Chaleur (Flux de chaleur sensible)
 - Watts m^2 (Watt = J/s) •
 - Positif (Chaleur ajoutée à l'atmosphère)
- Humidité (flux de chaleur latente = évapotranspiration)
 - Watts m^2 (Watt = J/s)
 - mm jour^{-1}
 - Positif (humidité ajoutée à l'atmosphère)

- Connaissance des processus de l'écosystème au niveau du site

Flux à l'échelle de l'écosystème

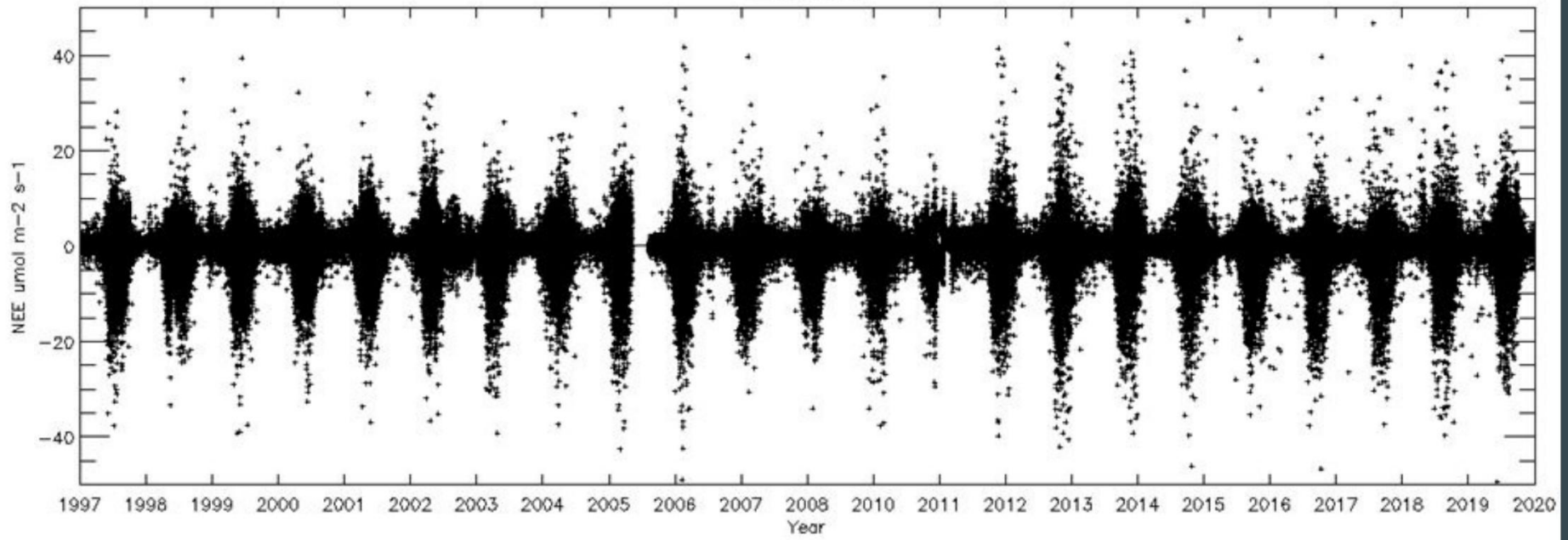
- Taux de séquestration du carbone
- Taux d'évapotranspiration
- Taux du transfert de chaleur turbulent vers l'atmosphère depuis la surface
- Recharge des eaux souterraines

Eddy Covariance

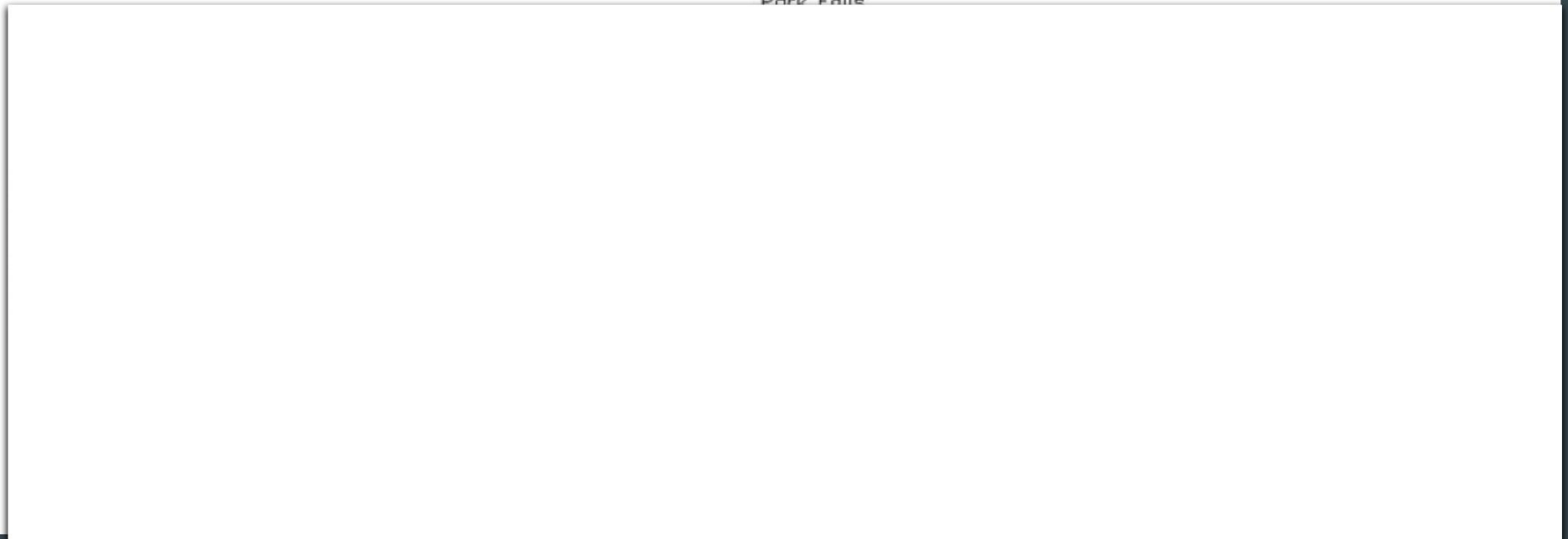


- Tendances à long terme, variabilité interannuelle

Park Falls



Park Falls

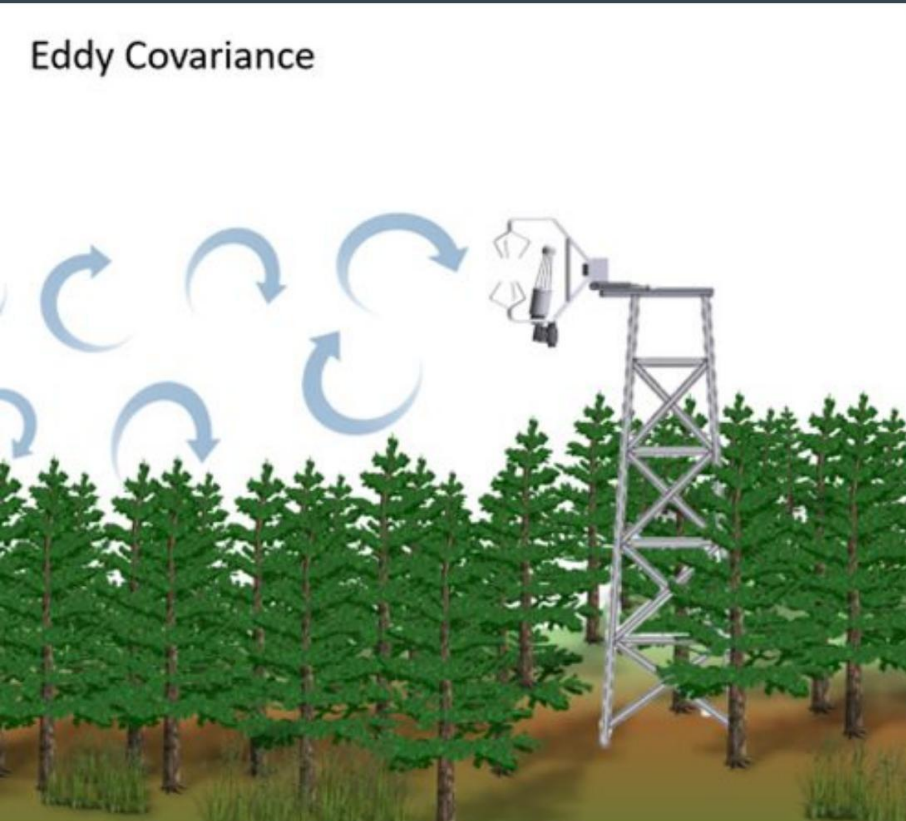


- Connaissance des processus de l'écosystème au niveau du site

Flux à l'échelle de l'écosystème

- Taux de séquestration du carbone
- Taux d'évapotranspiration
- Taux du transfert de chaleur turbulent vers l'atmosphère depuis la surface
- Recharge des eaux souterraines

Eddy Covariance

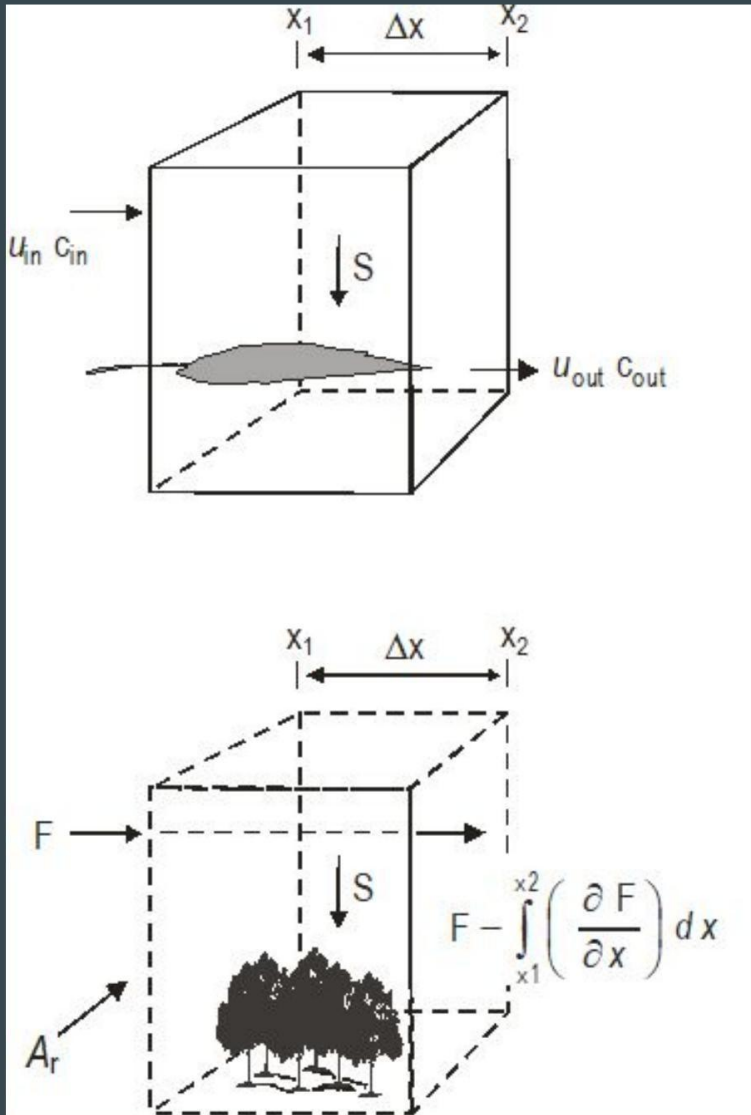


- Tendances à long terme, variabilité interannuelle – solutions climatiques naturelles
- Informations temporelles pour les besoins d'inventaire
- Perturbations (incendies, invasions d'insectes, incendies)
- Moments chauds
- Soutenir la prise de décision de la gestion
- Valider les modèles globaux
- Paramétrer les modèles globaux
- Produits de télédétection de réalité terrain
- Tester les principes écologiques

Faites votre choix !

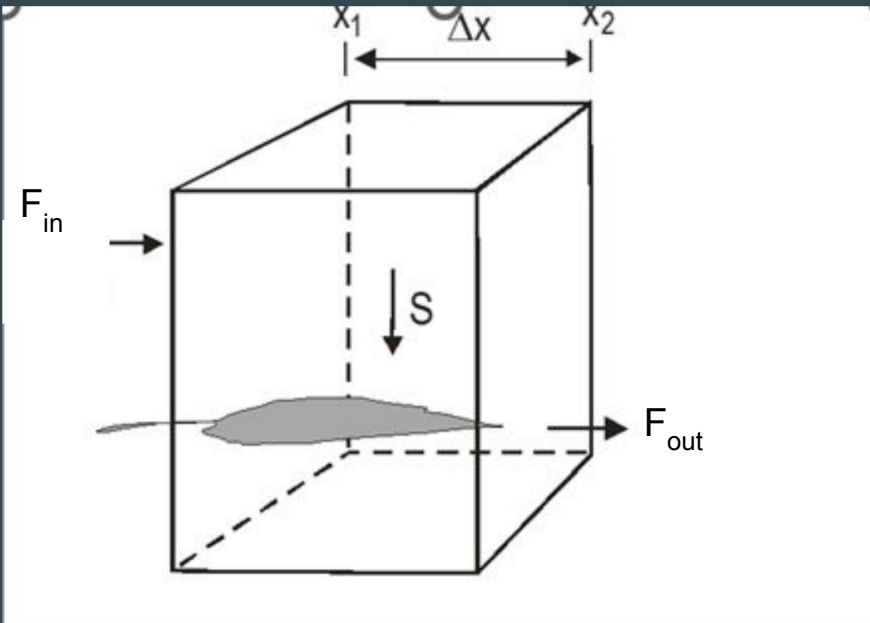


Flux turbulent



- Théorie de base et concepts importants
- Concepts de lien entre les flux au niveau des feuilles et au niveau de l'écosystème
- Hypothèses et limites fondamentales
- Termes clés
- Des tours simples aux réseaux !

Flux et unités avec la chambre Licor



$$S = F_{in} - F_{out} =$$

$$\frac{\text{mol CO}_2}{\text{m}^2 \text{ s}}$$

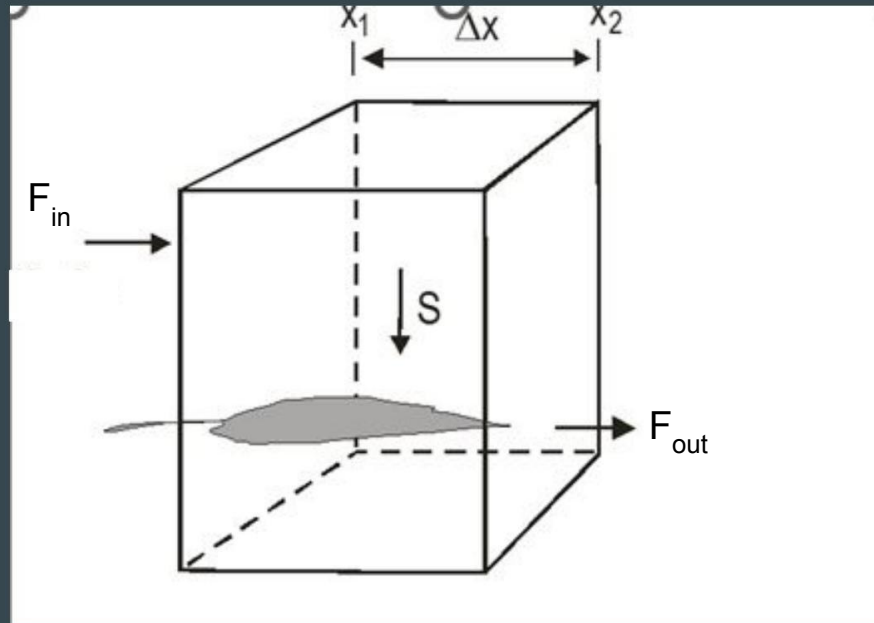
$$F_{in} =$$

$$u_{in} c_{in} = \frac{\text{mol (air)}}{\text{s}} \times \frac{\text{mol (CO}_2\text{)}}{\text{mol (air)}} \times \frac{1}{\text{m}^2 \text{ (leaf area)}}$$

$$F_{out} =$$

$$u_{out} c_{out} = \frac{\text{mol (air)}}{\text{s}} \times \frac{\text{mol (CO}_2\text{)}}{\text{mol (air)}} \times \frac{1}{\text{m}^2 \text{ (leaf area)}}$$

Alternativement, le flux peut être exprimé comme une vitesse de l'air (vitesse d'écoulement multipliée par une densité molaire :

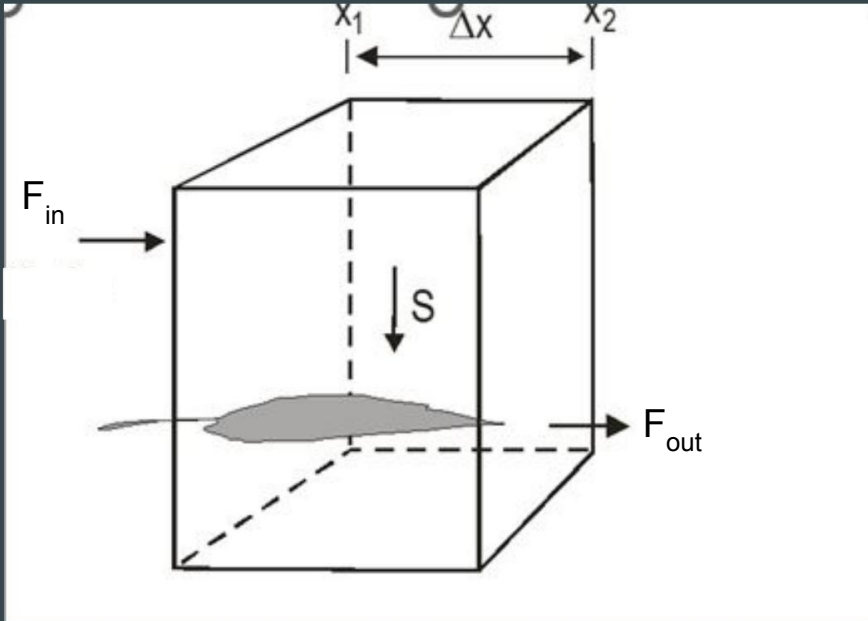


$$F_{in} = u_{in} c_{in} = \frac{m}{s} \times \frac{\text{mol}(\text{CO}_2)}{m^3} \times \frac{1}{m^2(\text{leaf area})}$$

$$F_{out} = u_{out} c_{out} = \frac{m}{s} \times \frac{\text{mol}(\text{CO}_2)}{m^3} \times \frac{1}{m^2(\text{leaf area})}$$

$$S = F_{in} - F_{out} = \frac{\text{mol CO}_2}{m^2 s}$$

Alternativement, le flux peut être exprimé comme une vitesse de l'air (vitesse d'écoulement multipliée par une densité molaire :



$$F_{in} = \rho_a u_{in} c_{in} = \frac{\text{mol (air)}}{\text{m}^3} \times \frac{\text{m}}{\text{s}} \times \frac{\text{mol (CO}_2\text{)}}{\text{mol (air)}}$$

density Mole fraction

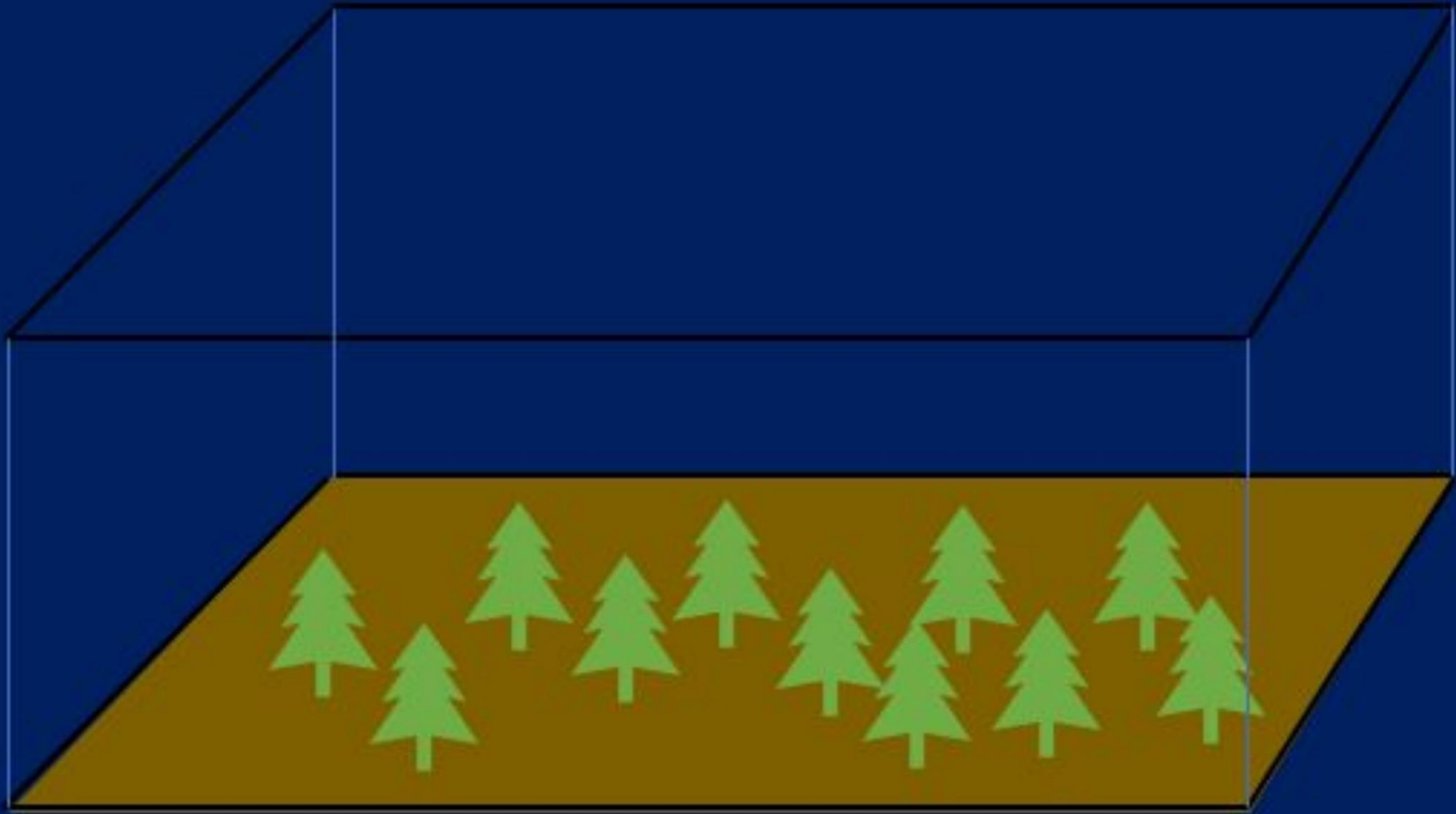
$$F_{out} = \rho_a u_{out} c_{out} = \frac{\text{mol (air)}}{\text{m}^3} \times \frac{\text{m}}{\text{s}} \times \frac{\text{mol (CO}_2\text{)}}{\text{mol (air)}}$$

density Mole fraction

$$S = F_{in} - F_{out} =$$

$$\frac{\text{mol CO}_2}{\text{m}^2 \text{ s}}$$

Maintenant, qu'est ce qui change à mesure que nous progressons vers un écosystème ?



Il faut tenir compte des flux dans l'atmosphère et de la turbulence

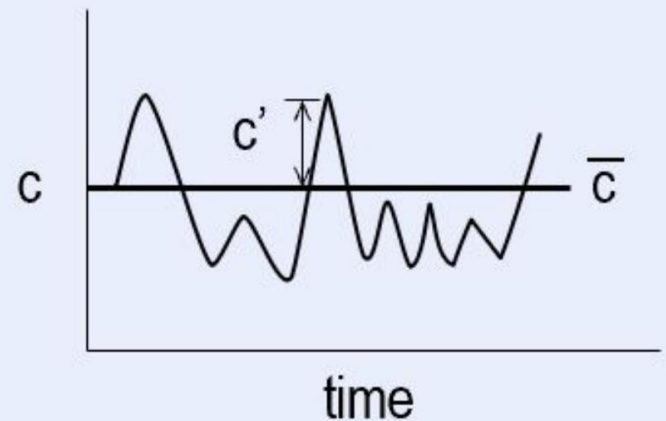
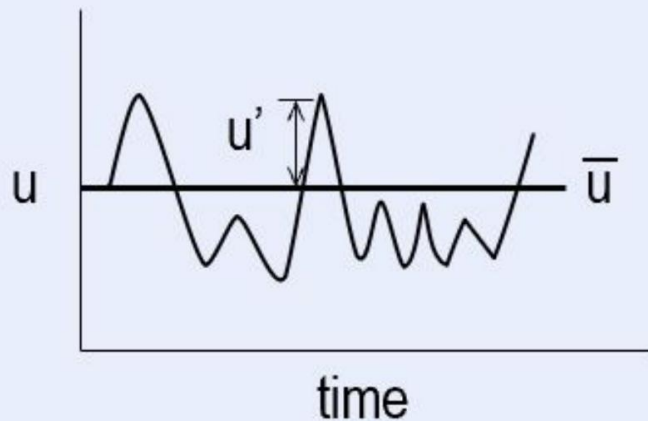
- Pas cohérent en termes de vitesse ou de direction
- Le vent ne passe pas devant un anémomètre à une vitesse constante : il « oscille »
- A tout instant, la vitesse enregistrée par un anémomètre reflète une composante **moyenne et une composante turbulente**

Reynold's averaging

overbar = moyenne
temporelle

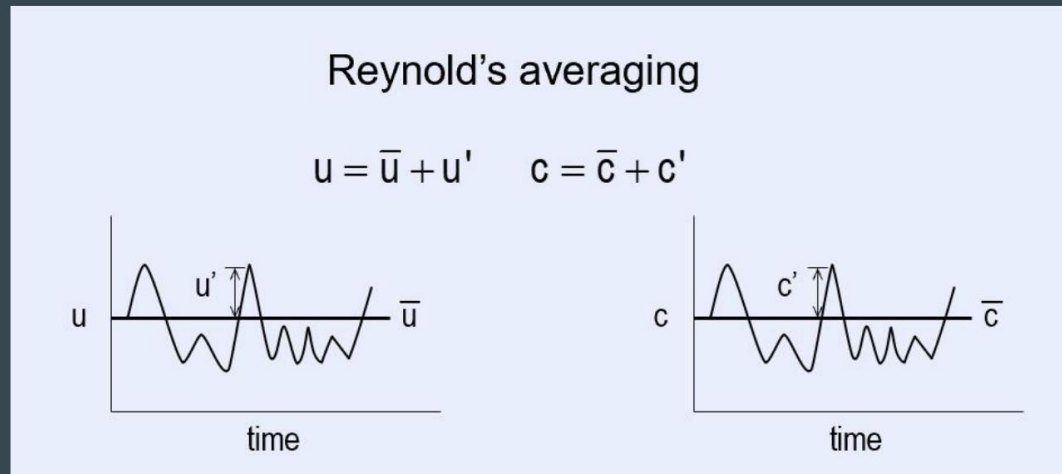
$$u = \bar{u} + u' \quad c = \bar{c} + c'$$

prime = écart par rapport à la
valeur moyenne dans le temps



Flux turbulent : covariance de turbulence

- Covariance statistique entre la composante turbulente du vent (vitesse horizontale du vent) et la concentration de l'entité scalaire transportée par la composante turbulente du vent



we want the flux averaged over time \overline{uc}

$$\overline{uc} = \overline{(\bar{u} + u')(\bar{c} + c')} = \overline{\bar{u}\bar{c}} + \overline{\bar{u}c'} + \overline{\bar{c}u'} + \overline{c'u'} = \bar{u}\bar{c} + \overline{c'u'}$$

$\bar{c}' = 0$ $\bar{u}' = 0$

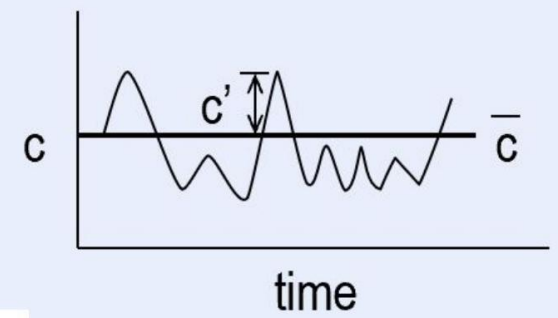
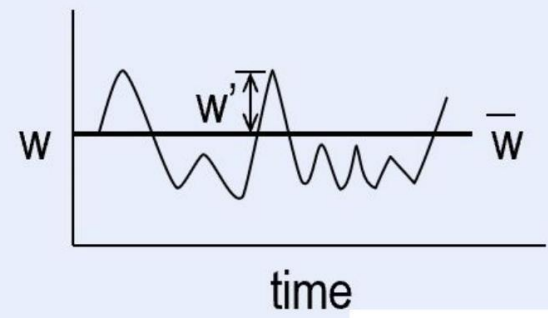
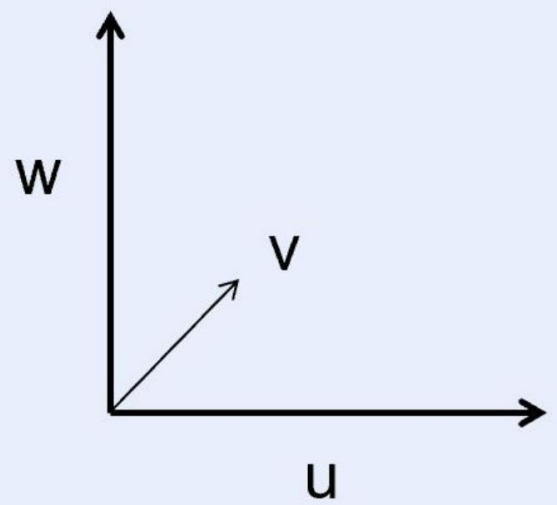
advection

covariance

The covariance in which we are typically most interested is the vertical turbulent covariance – $\overline{w'c'}$

Reynold's averaging

$$w = \bar{w} + w' \quad c = \bar{c} + c'$$



$$\bar{w} = 0$$

$$\overline{uc} = \overline{u\bar{c}} + \overline{c'u'}$$

$$\overline{wc} = \overline{w\bar{c}} + \overline{c'w'}$$

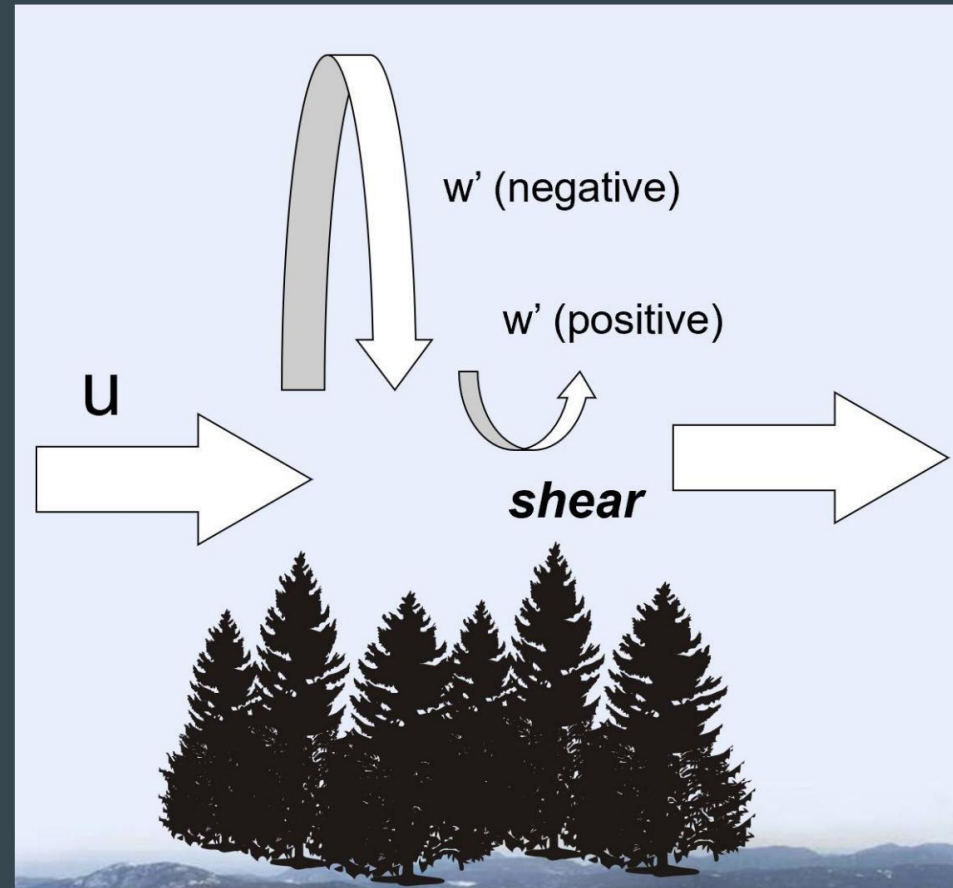
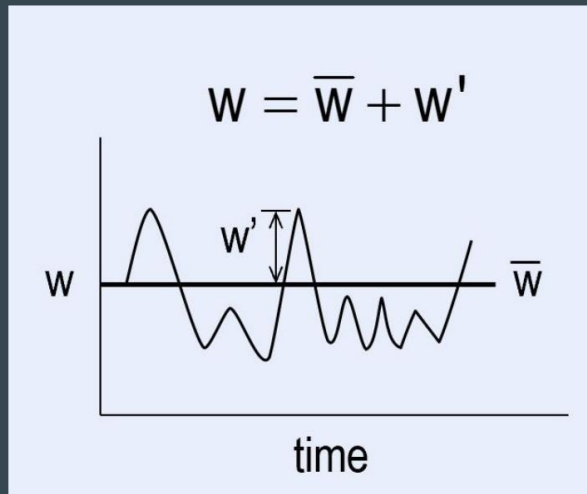
Advection

Covariance

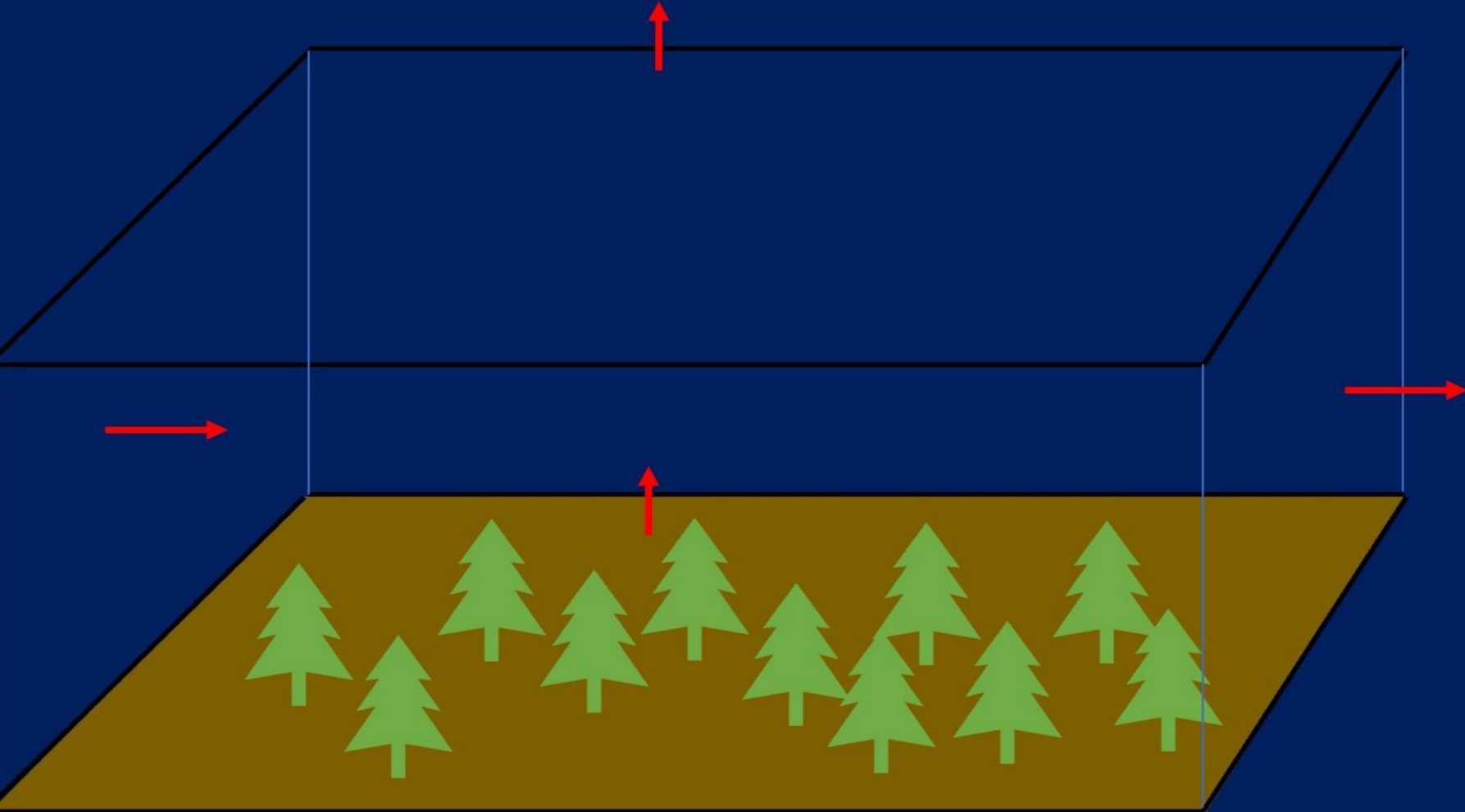


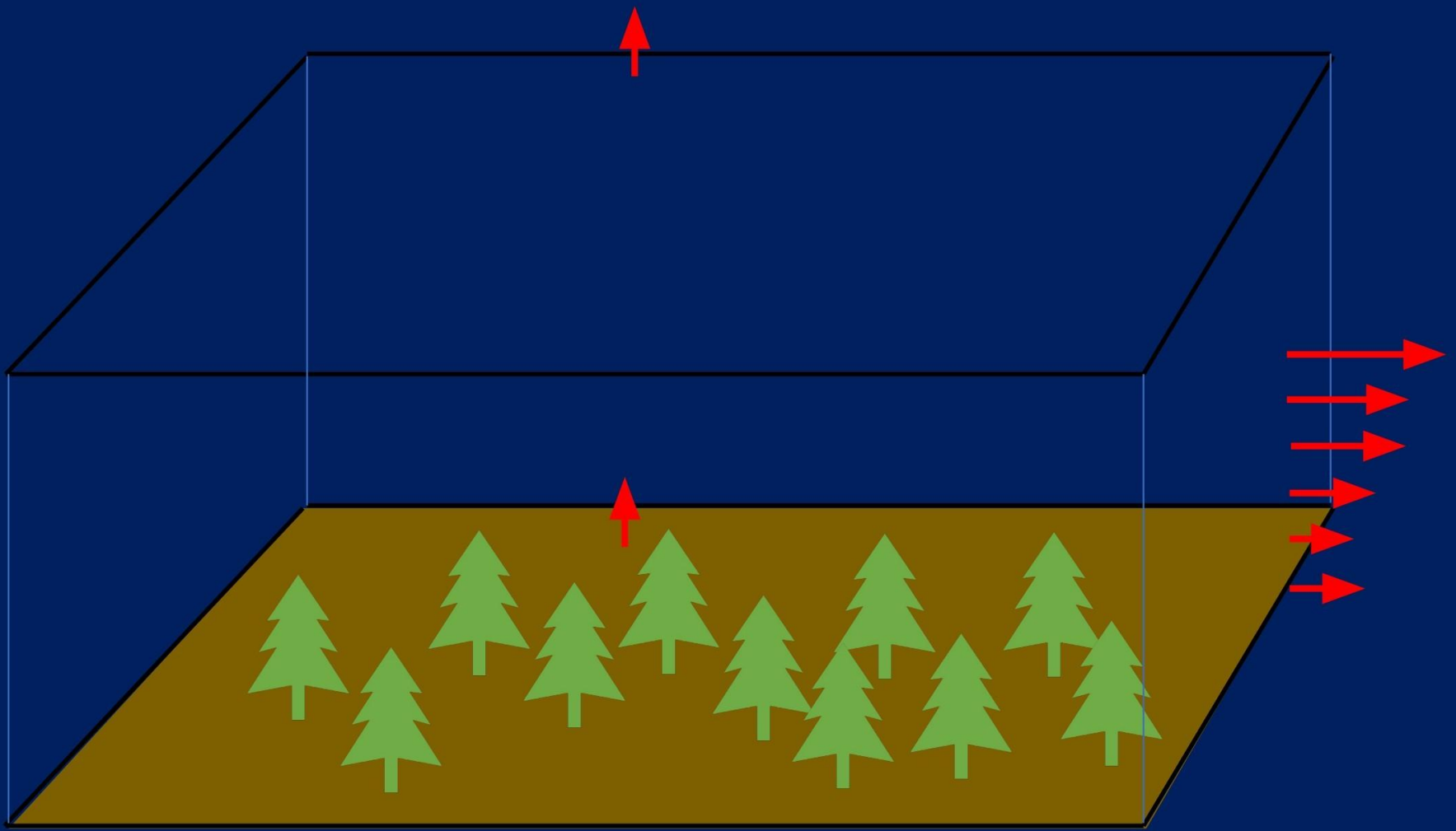
Qu'est ce qui entraîne le flux turbulent vertical ?

- Contrainte de cisaillement
- Rugosité
- Frottement
- Tourbillons



Et si on ouvrait la boîte ?





- 
- 
- 
- 
- 
- 

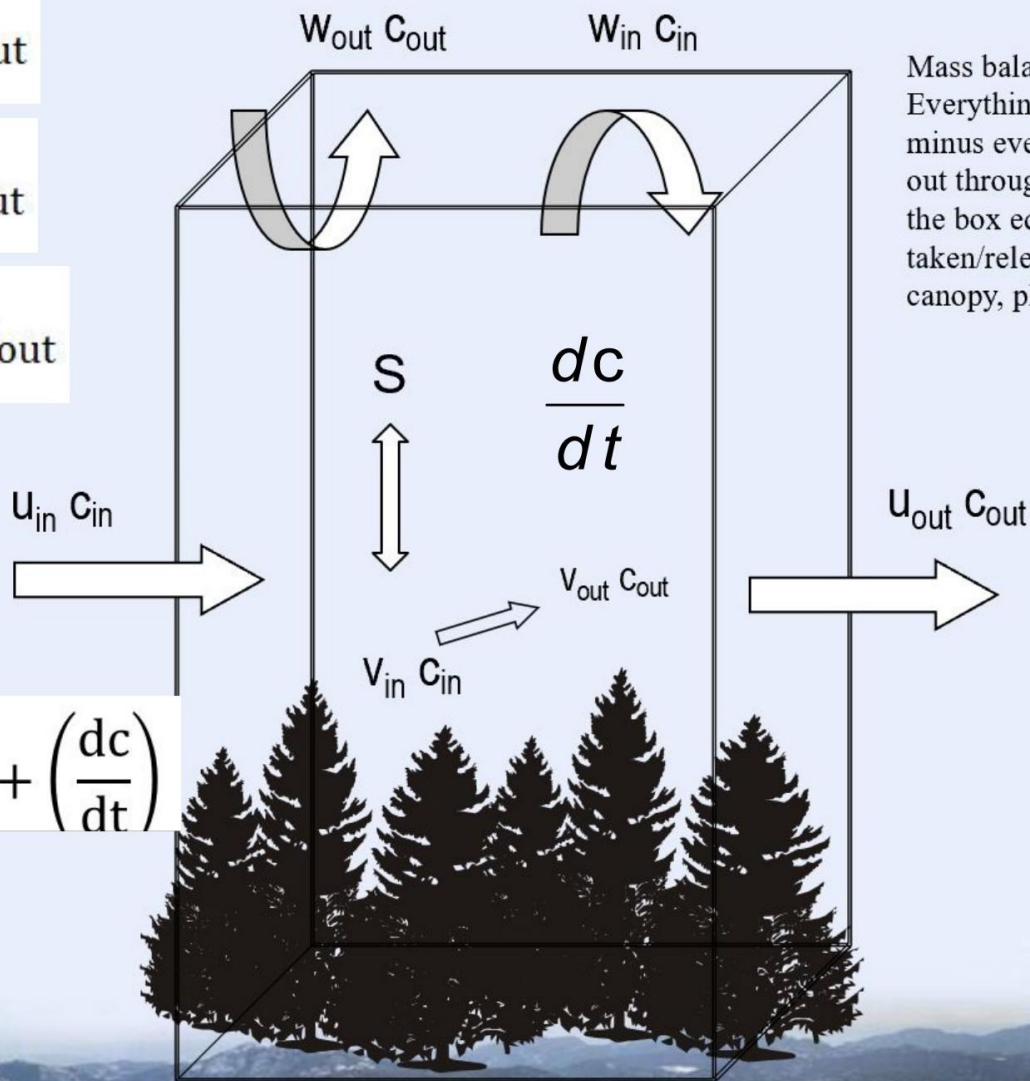
The wind works within a 3-D coordinate system, so the flux vectors are not as neatly sorted as they are with a leaf chamber

$$\Delta F_x = u_{in} C_{in} - u_{out} C_{out}$$

$$\Delta F_y = v_{in} C_{in} - v_{out} C_{out}$$

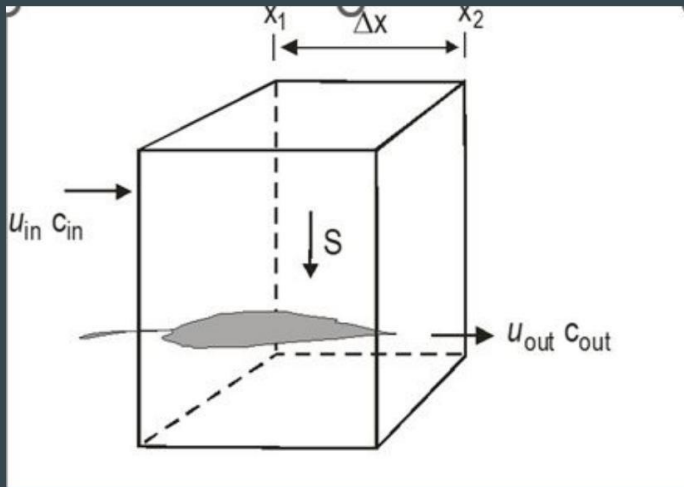
$$\Delta F_z = w_{in} C_{in} - w_{out} C_{out}$$

$$\frac{\Delta F_x}{\Delta x} + \frac{\Delta F_y}{\Delta y} + \frac{\Delta F_z}{\Delta z} = S + \left(\frac{dc}{dt} \right)$$



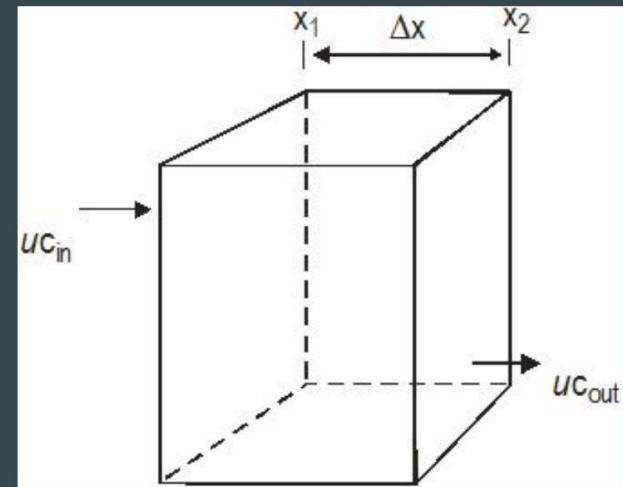
Mass balance:
Everything that goes in minus everything that goes out through the surfaces of the box equals what is taken/released by the canopy, plus storage

Bilan de masse, la clé à retenir ici



$$S = u_{in} c_{in} - u_{out} c_{out}$$

Le changement de concentration de la quantité dans le volume fixe doit être conforme à l'activité source/puits



$$S = u_{in} c_{in} - u_{out} c_{out}$$

In an empty chamber (no sources or sinks) $F_{in} = F_{out}$ and $\Delta c / \Delta t = 0$.

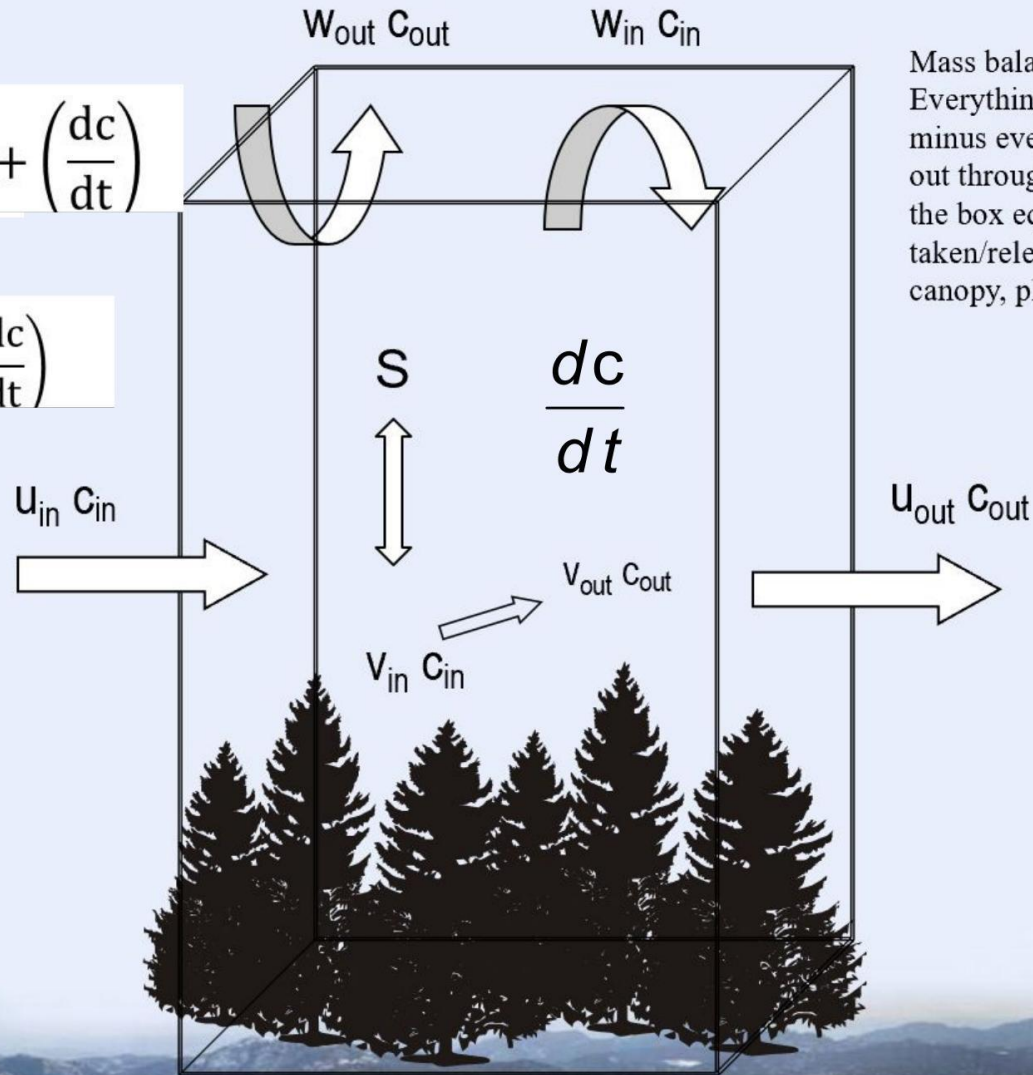
$$\frac{\Delta F_x}{\Delta x} + \frac{\Delta F_y}{\Delta y} + \frac{\Delta F_z}{\Delta z} = S + \left(\frac{dc}{dt}\right)$$

~~$$\frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z} = S + \left(\frac{dc}{dt}\right)$$~~

Si nous supposons une homogénéité horizontale, les gradients horizontaux s'annulent

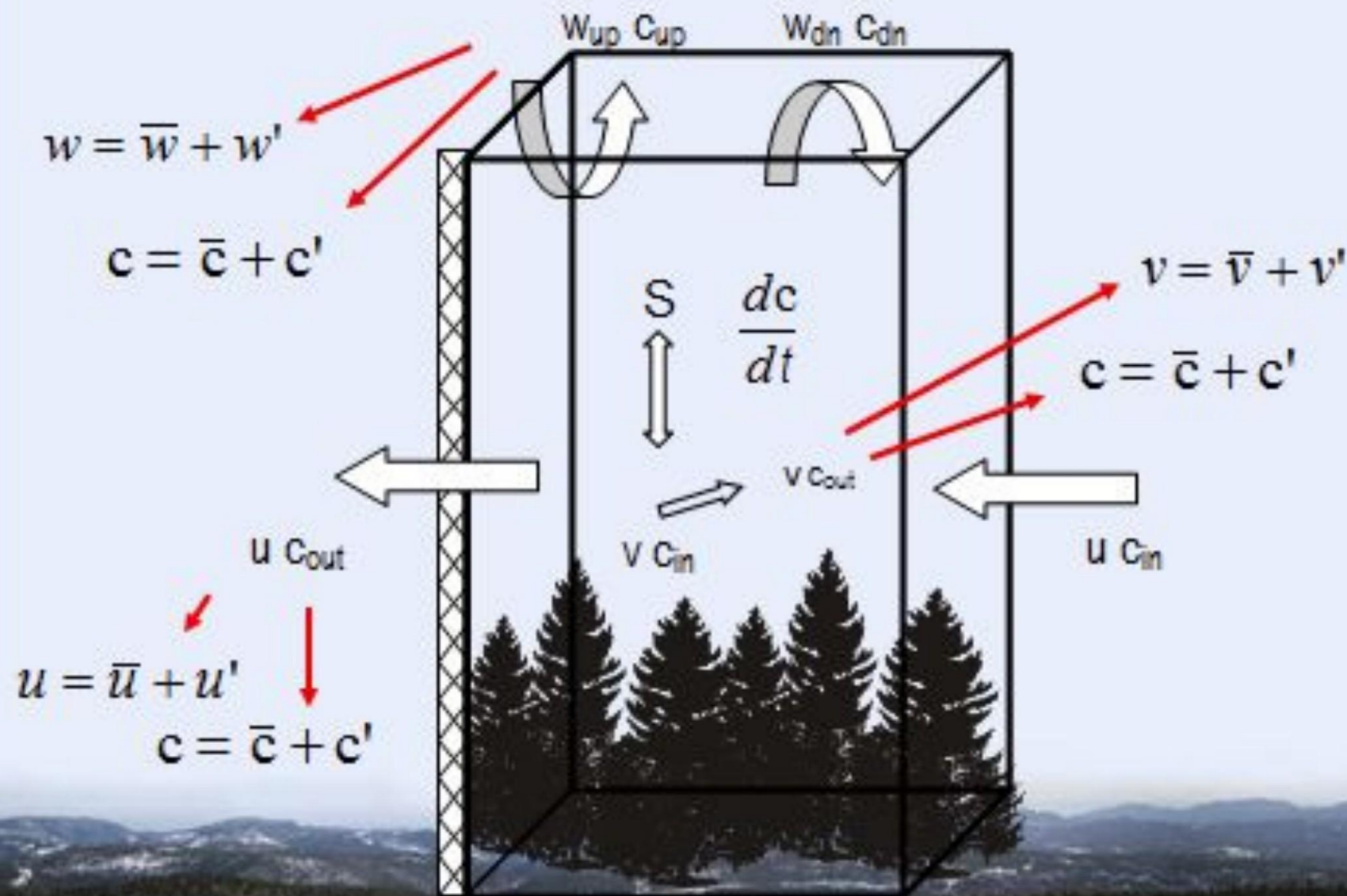
$$\frac{\partial}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial y} = 0$$



Mass balance:
Everything that goes in minus everything that goes out through the surfaces of the box equals what is taken/released by the canopy, plus storage

Applying Reynolds averaging to our wind flows through our hypothetical control volume

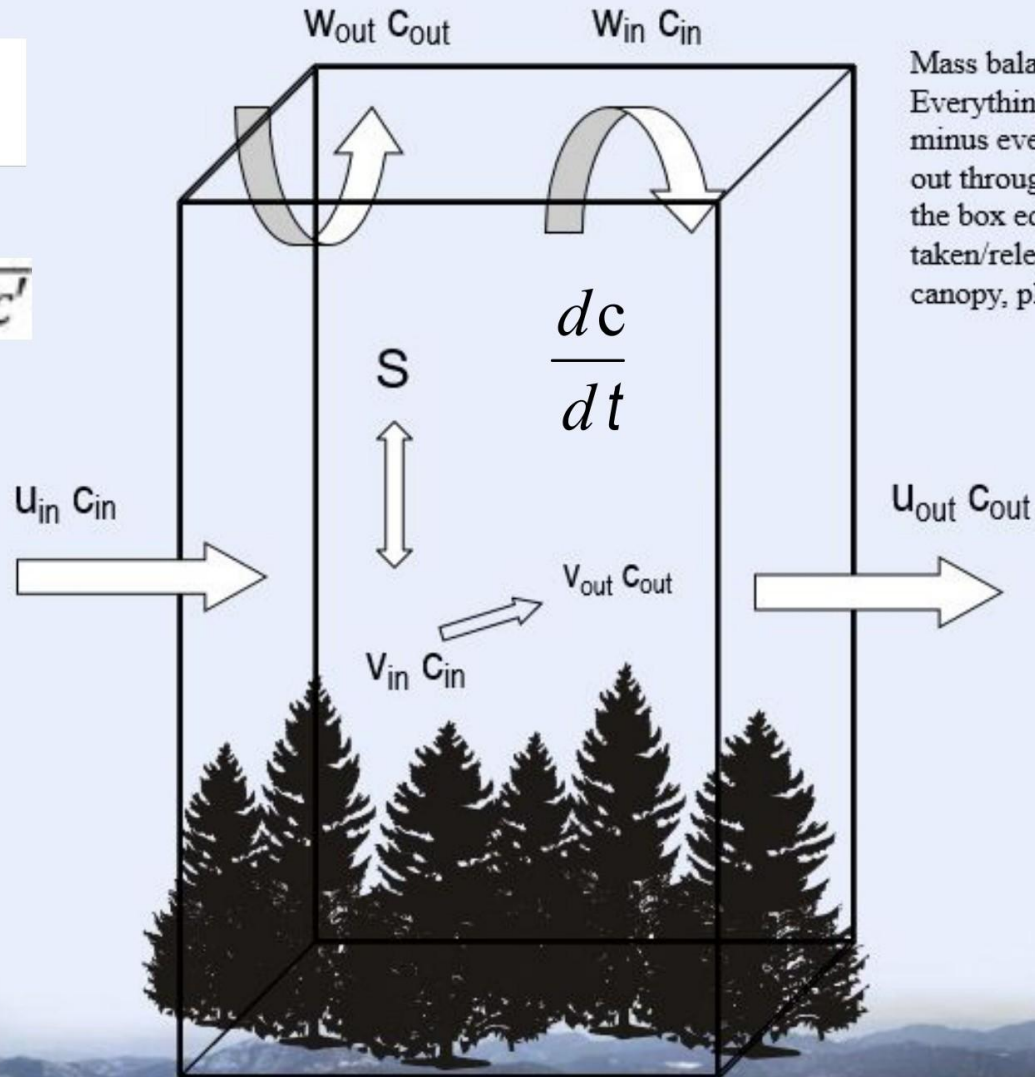


$$\frac{\partial F_z}{\partial z} = S + \left(\frac{dc}{dt} \right)$$

$$F_z = \overline{wC} = \overline{w}C + \overline{w'c'}$$

$$\overline{w} = 0$$

$$\frac{\partial(\overline{w'c'})}{\partial z} = S + \left(\frac{dc}{dt} \right)$$

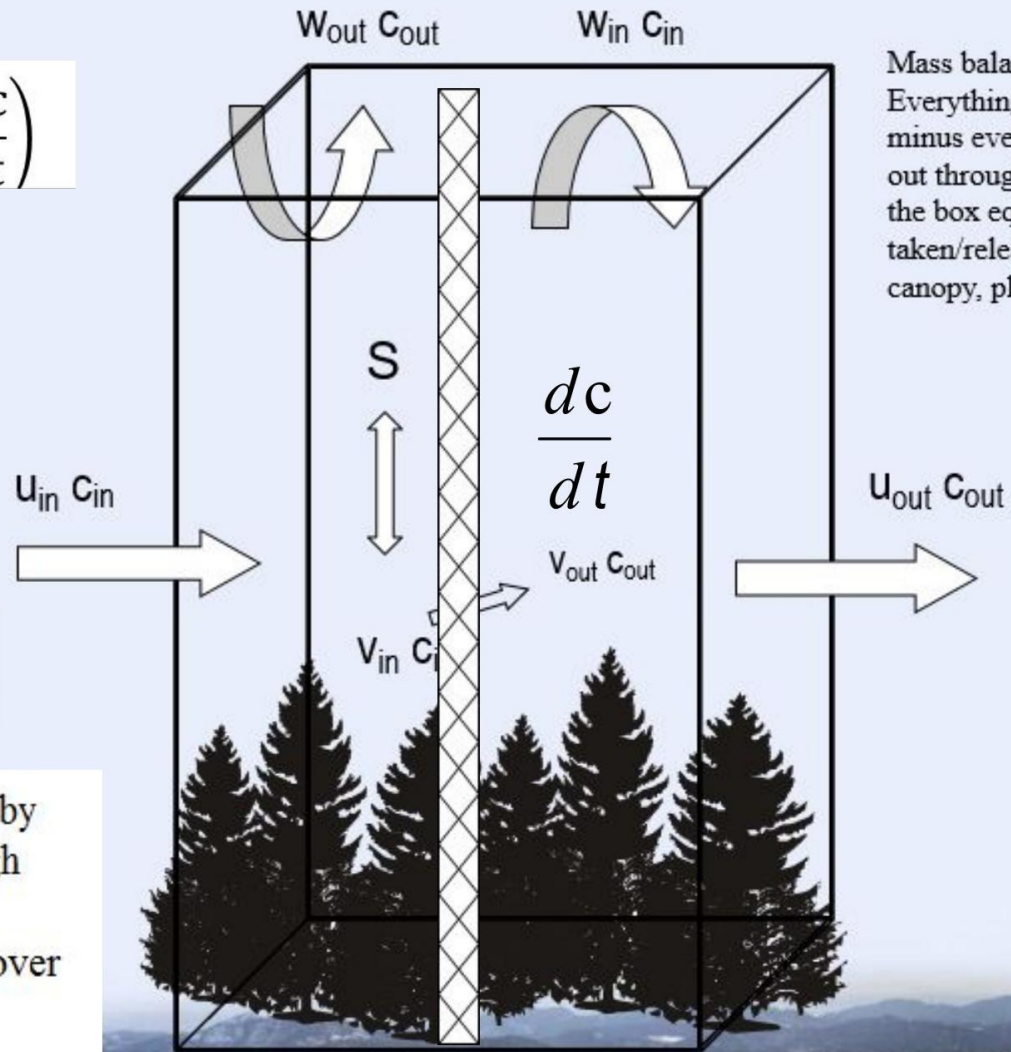


Mass balance:
Everything that goes in minus everything that goes out through the surfaces of the box equals what is taken/released by the canopy, plus storage

$$\frac{\partial(\overline{w'c'})}{\partial z} = S + \left(\frac{dc}{dt}\right)$$

$$\int_0^h \frac{\partial(\overline{w'c'})}{\partial z} dz = \int_0^h S dz = F_c$$

Assumption: A flux measured by an eddy covariance system high enough above the canopy represents the integrated flux over all heights

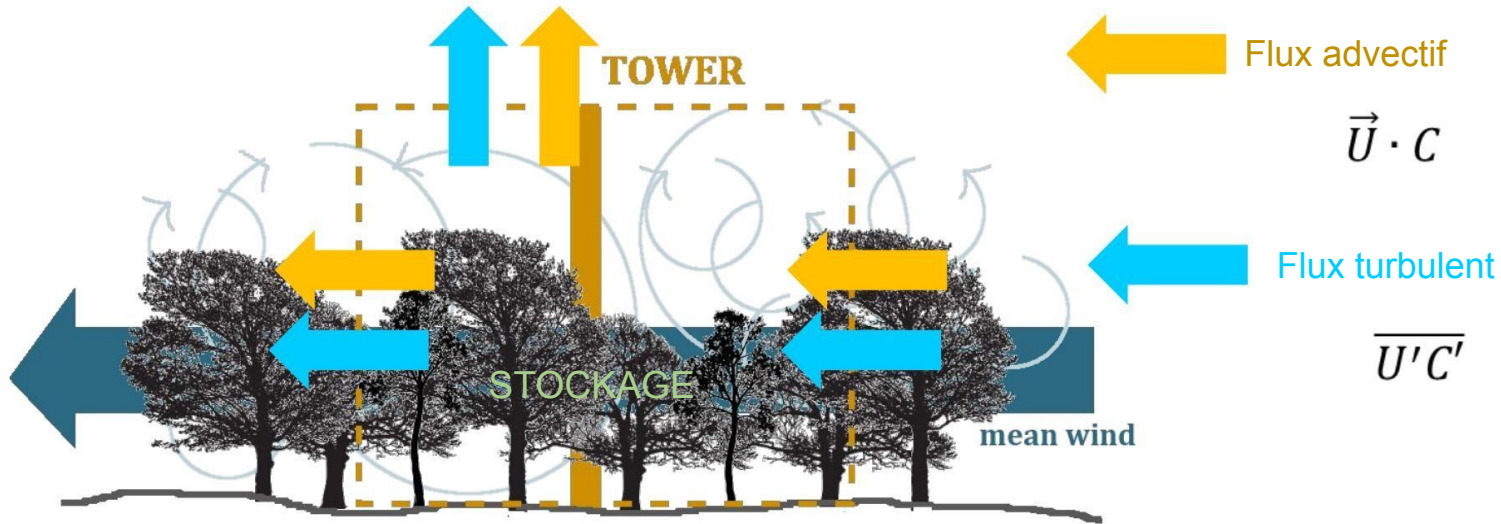


Mass balance:
Everything that goes in minus everything that goes out through the surfaces of the box equals what is taken/released by the canopy, plus storage

$$\int S(z) dz = \int \frac{\partial C}{\partial t} dz + \overline{w'c'}$$

Et... bien sûr, on ne peut pas ignorer le stockage

Hypothèses et limites fondamentales



$$NEE = \int_0^z \frac{\partial \overline{uc}}{\partial x} dz + \int_0^z \frac{\partial \overline{vc}}{\partial y} dz + \int_0^z \frac{\partial \overline{wc}}{\partial z} dz + \int_0^z \frac{\partial \overline{u'c'}}{\partial x} dz + \int_0^z \frac{\partial \overline{v'c'}}{\partial y} dz + \int_0^z \frac{\partial \overline{w'c'}}{\partial z} dz + \int_0^z \frac{\partial \overline{c}}{\partial t} dz$$

Flux advectifs dans 3 directions Flux turbulents dans 3 directions Stockage