



Journées Solene 2016

# Méthodologie de reconstitution de la température d'air d'un site urbain à partir de données météorologiques de site rural et de données géographiques

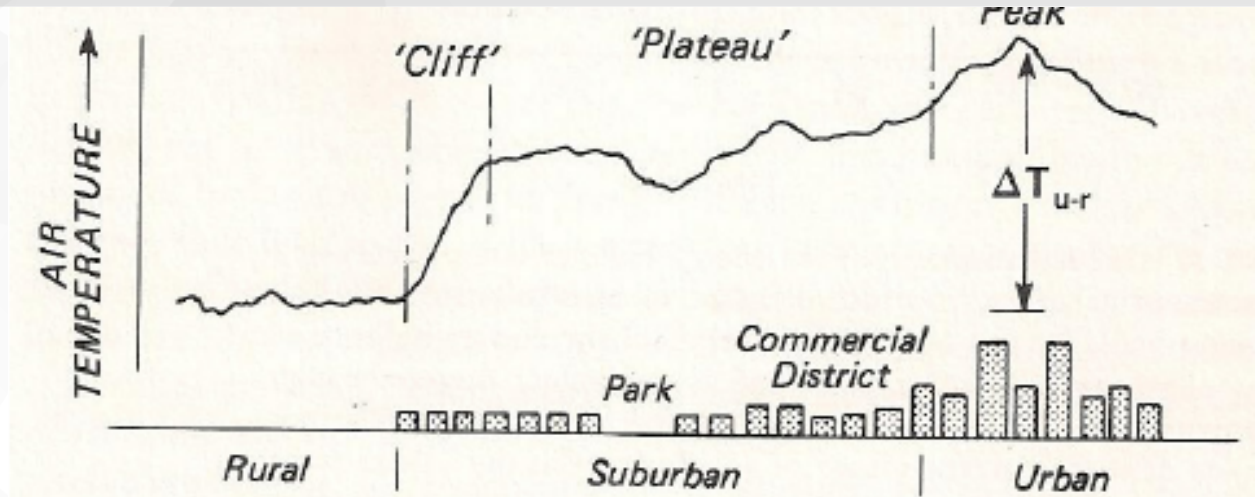
**Jérémy Bernard, doctorant au CRENAU et à l'IRSTV**

- ▼ *Marjorie Musy (CRENAU)*
- ▼ *Isabelle Calmet (LHEEA)*
- ▼ *Erwan Bocher (CNRS)*

1 décembre 2016

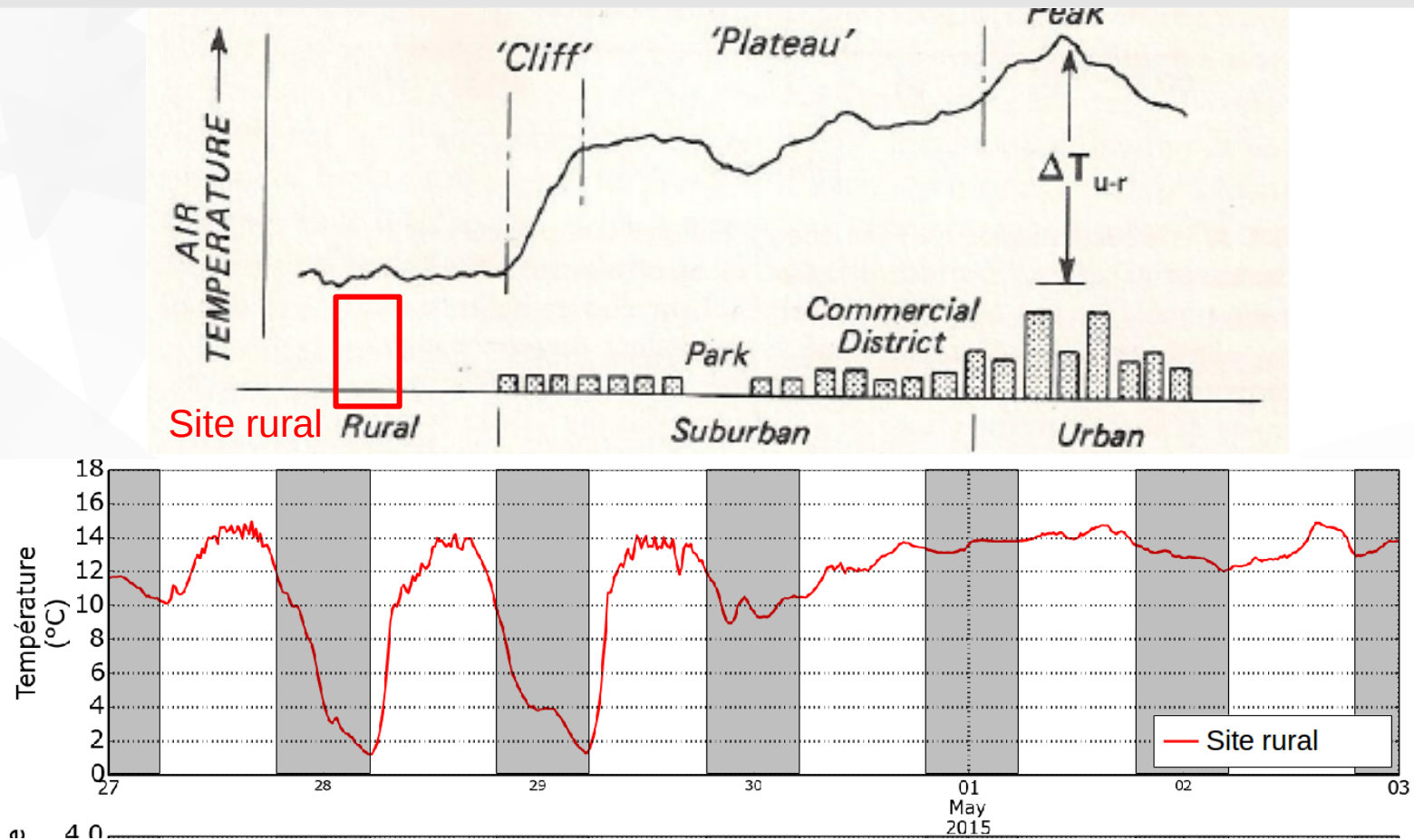
# Objectif

## Reconstitution du signal de température d'air



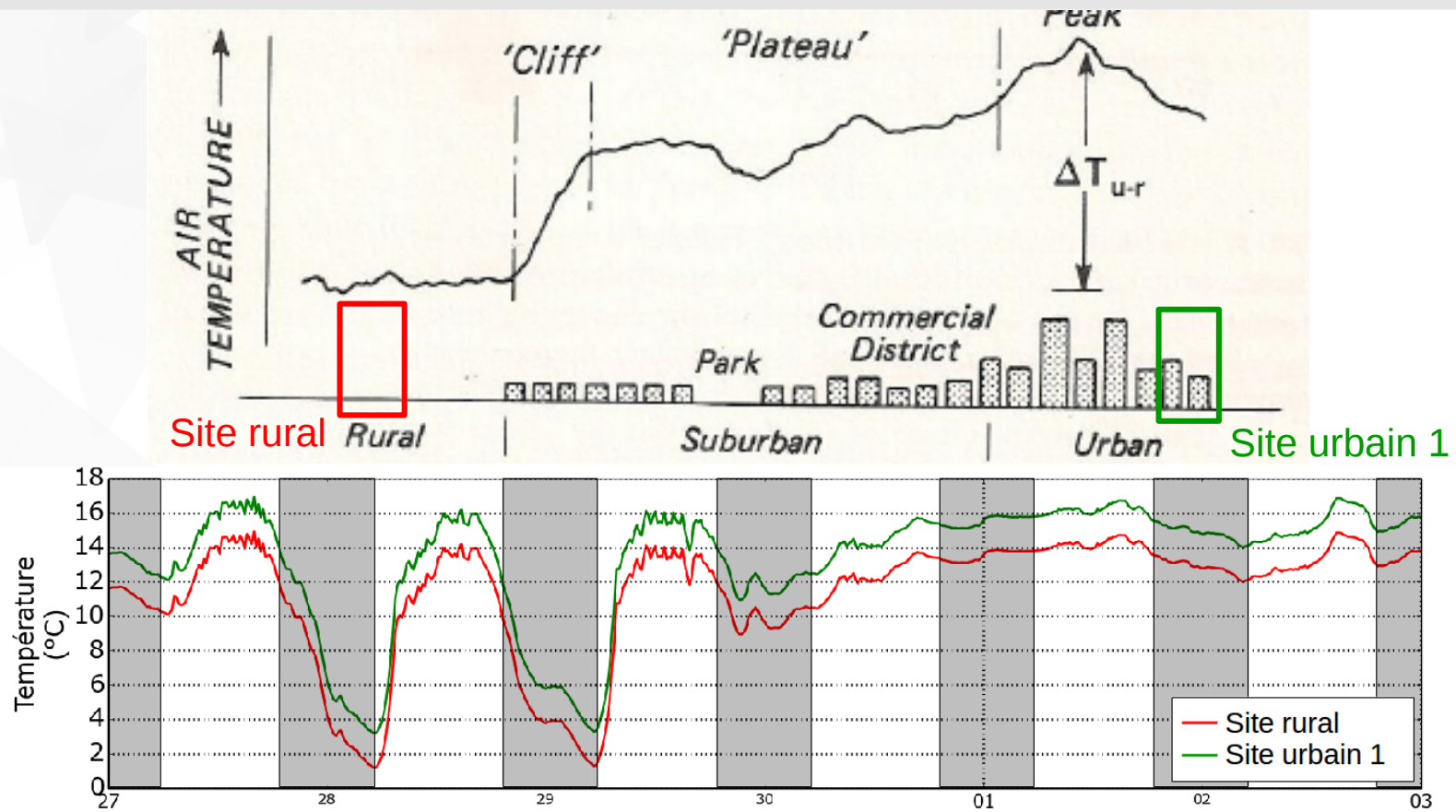
# Objectif

## Reconstitution du signal de température d'air



# Objectif

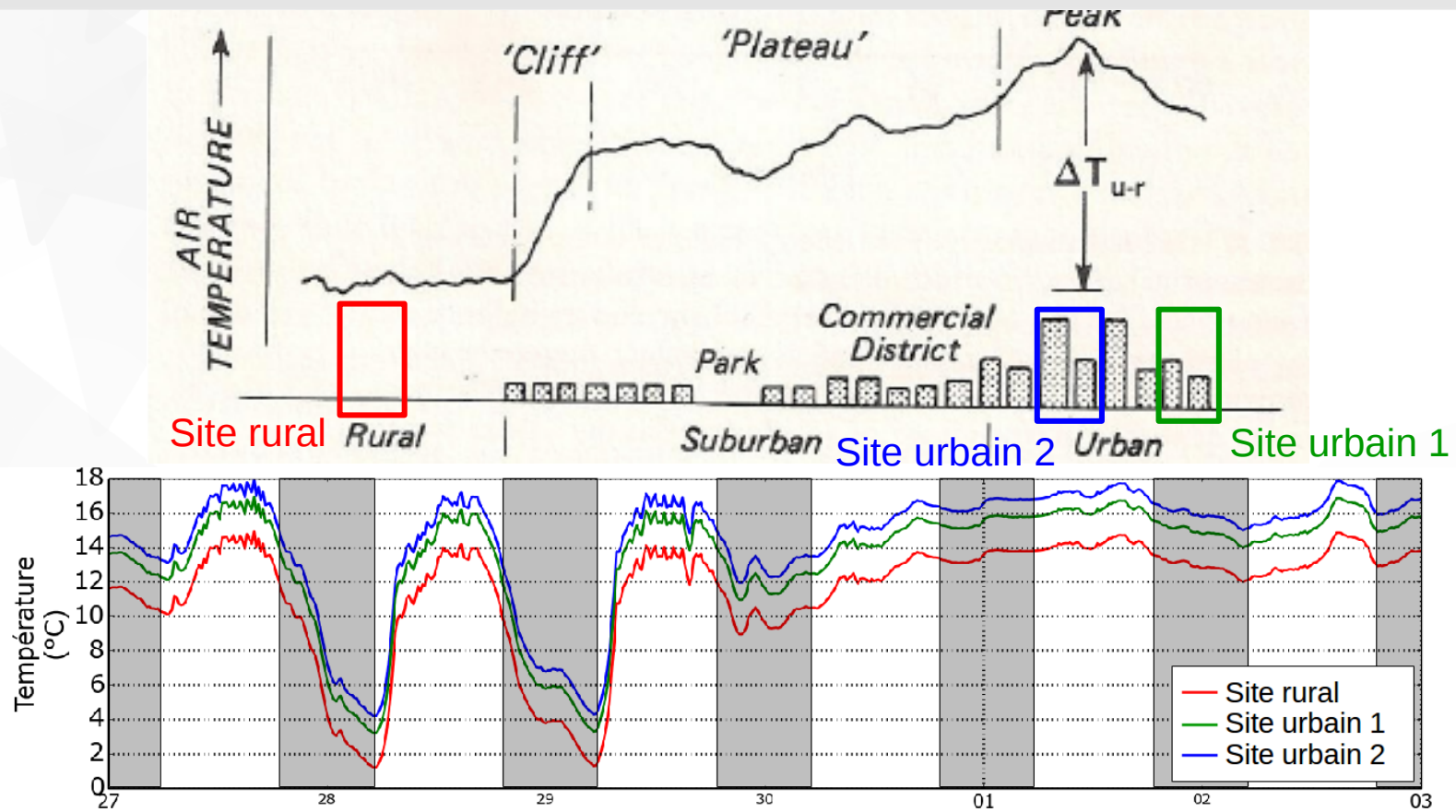
## Reconstitution du signal de température d'air





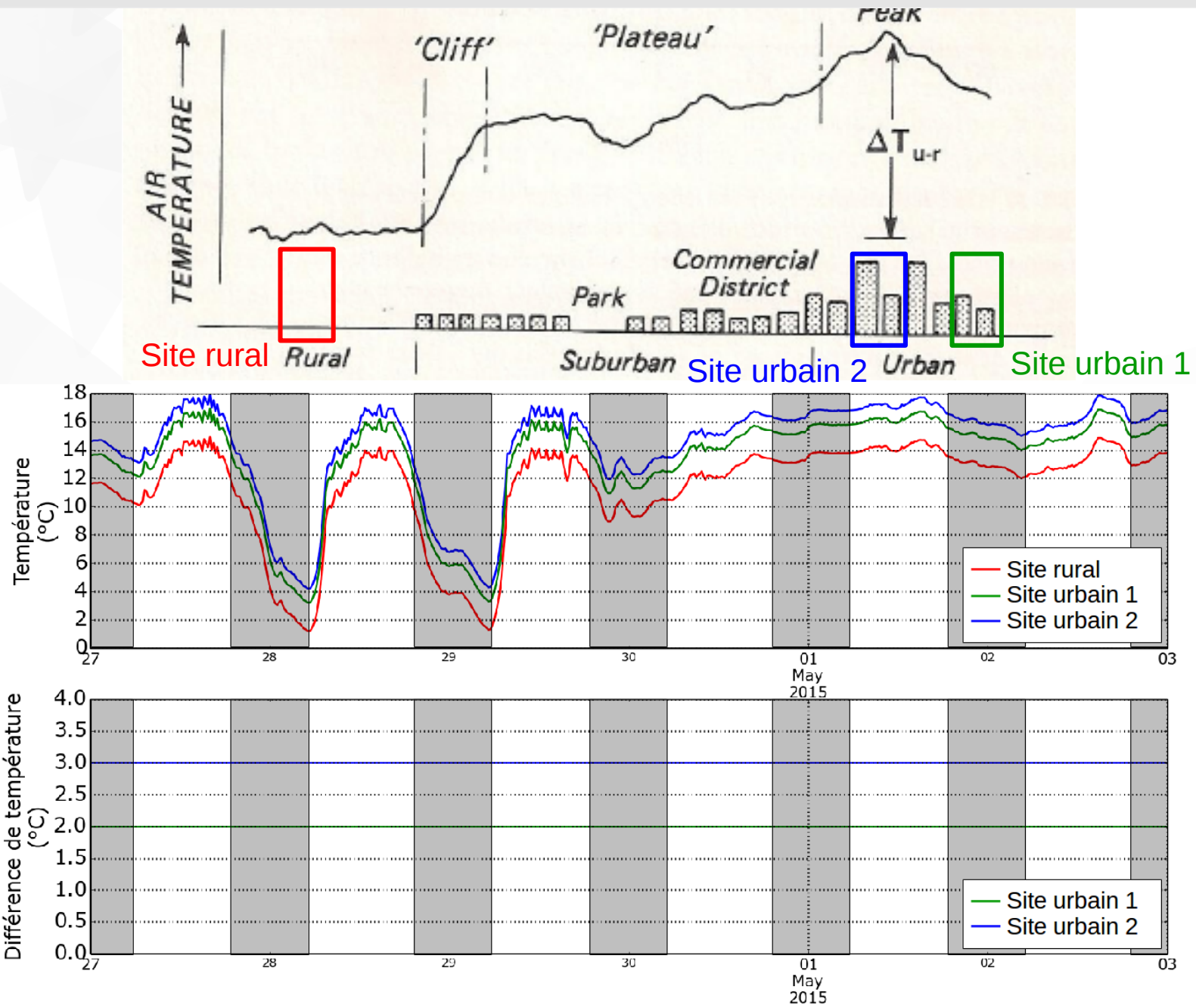
# Objectif

## Reconstitution du signal de température d'air



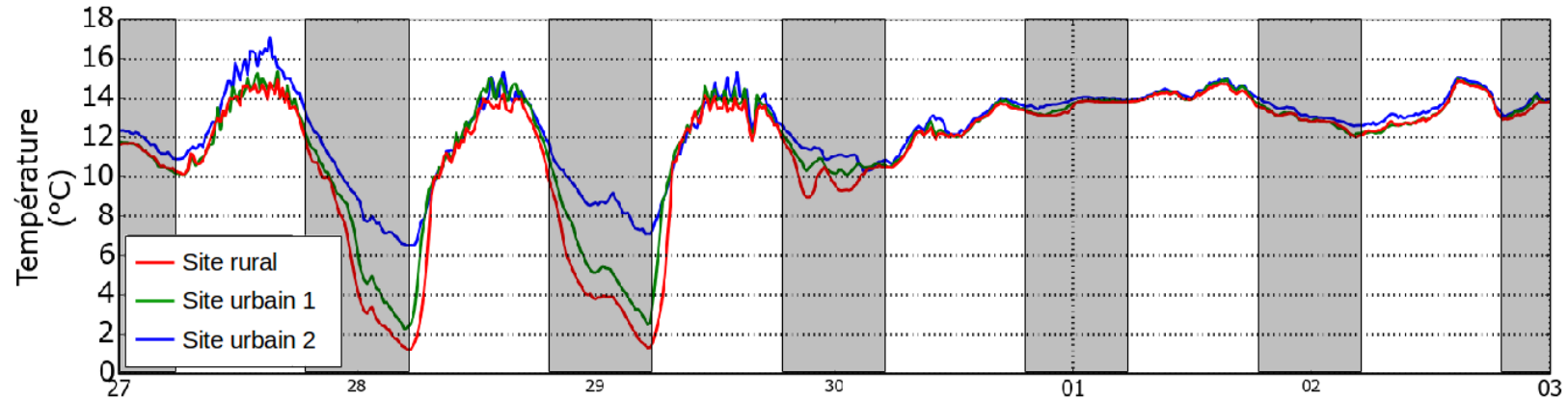
# Objectif

## Reconstitution du signal de température d'air



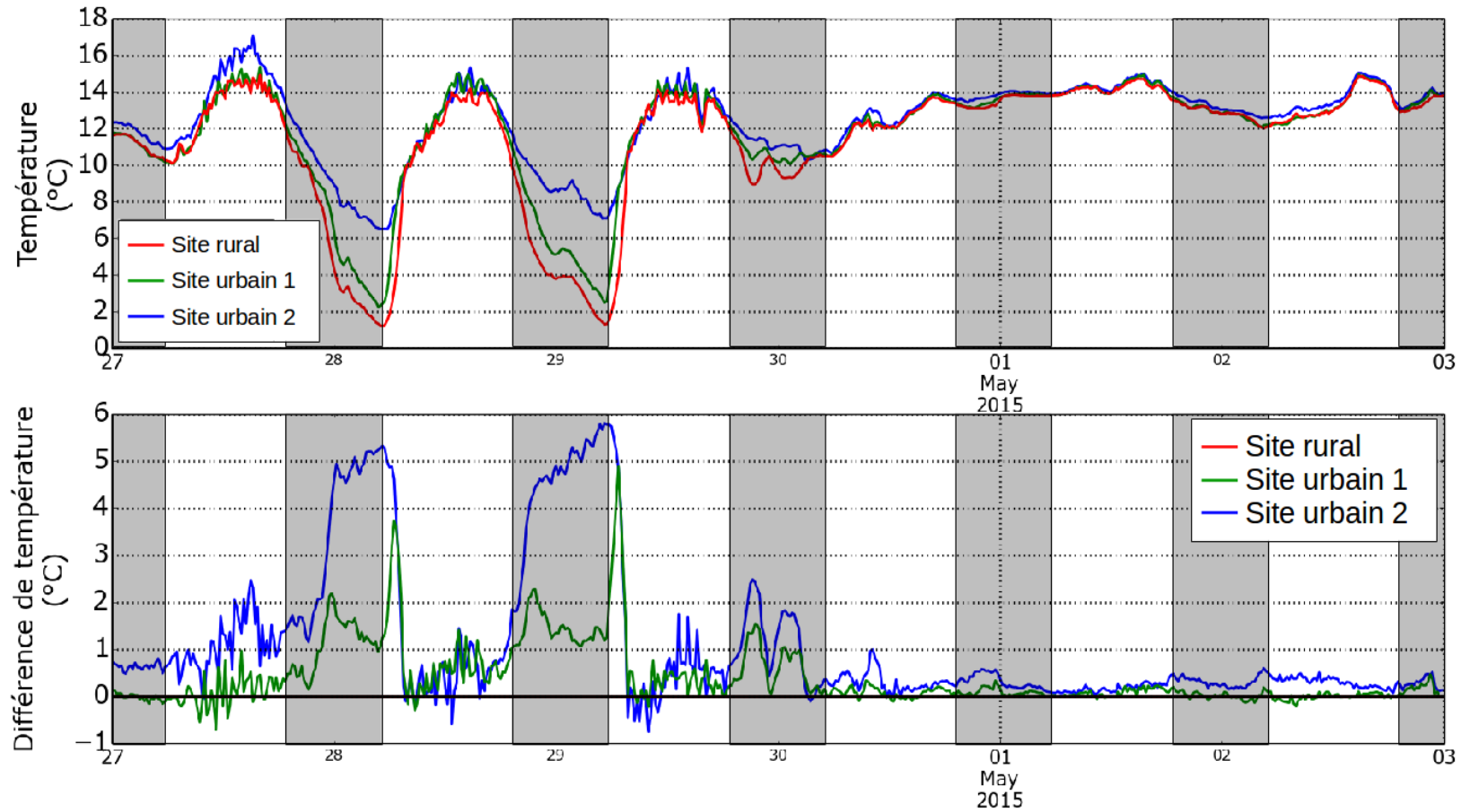
# Objectif

## Reconstitution du signal de température d'air

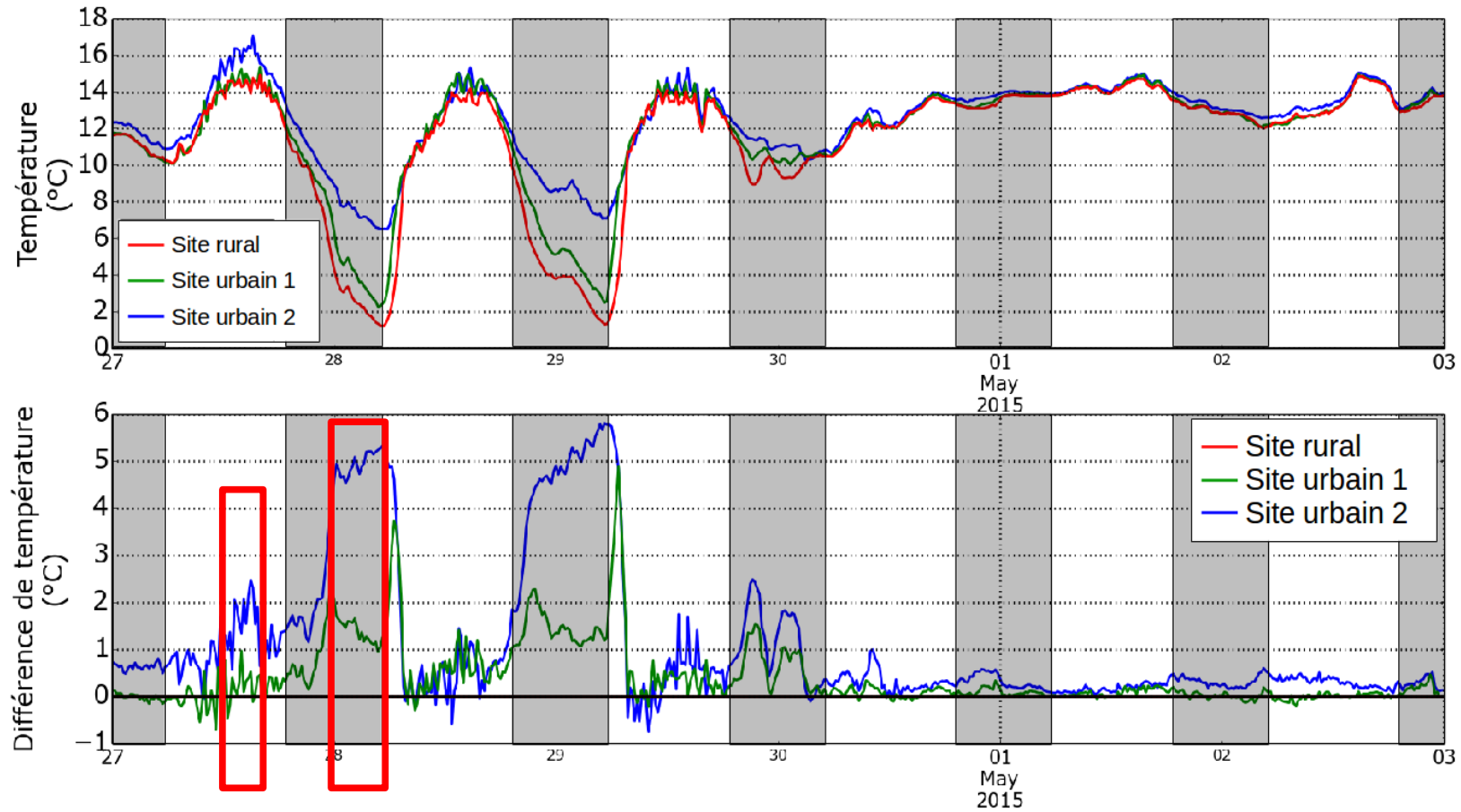


# Objectif

## Reconstitution du signal de température d'air

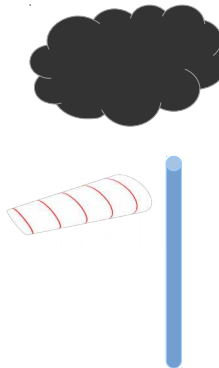
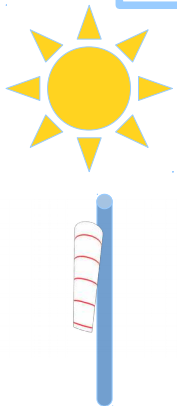
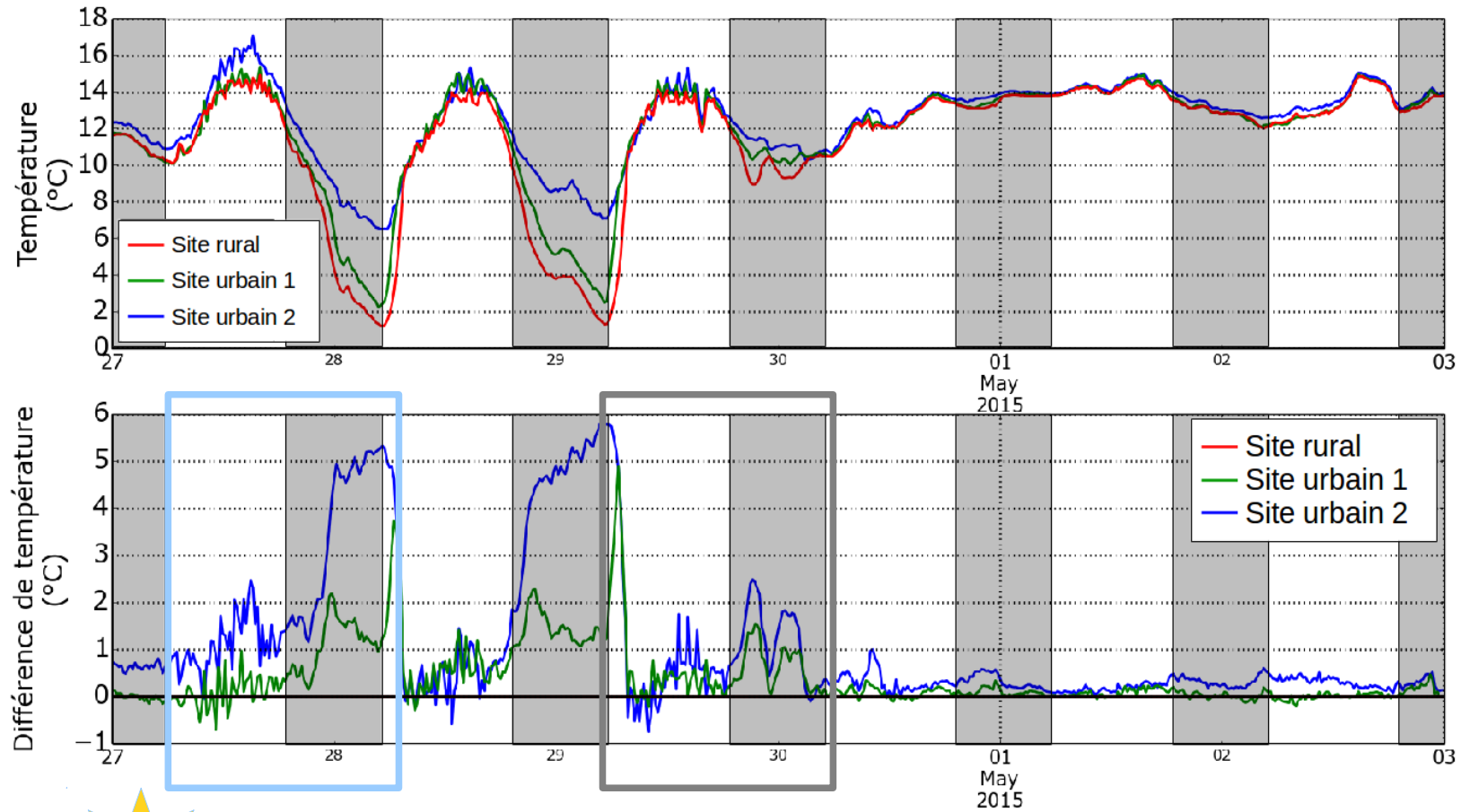


## Reconstitution du signal de température d'air



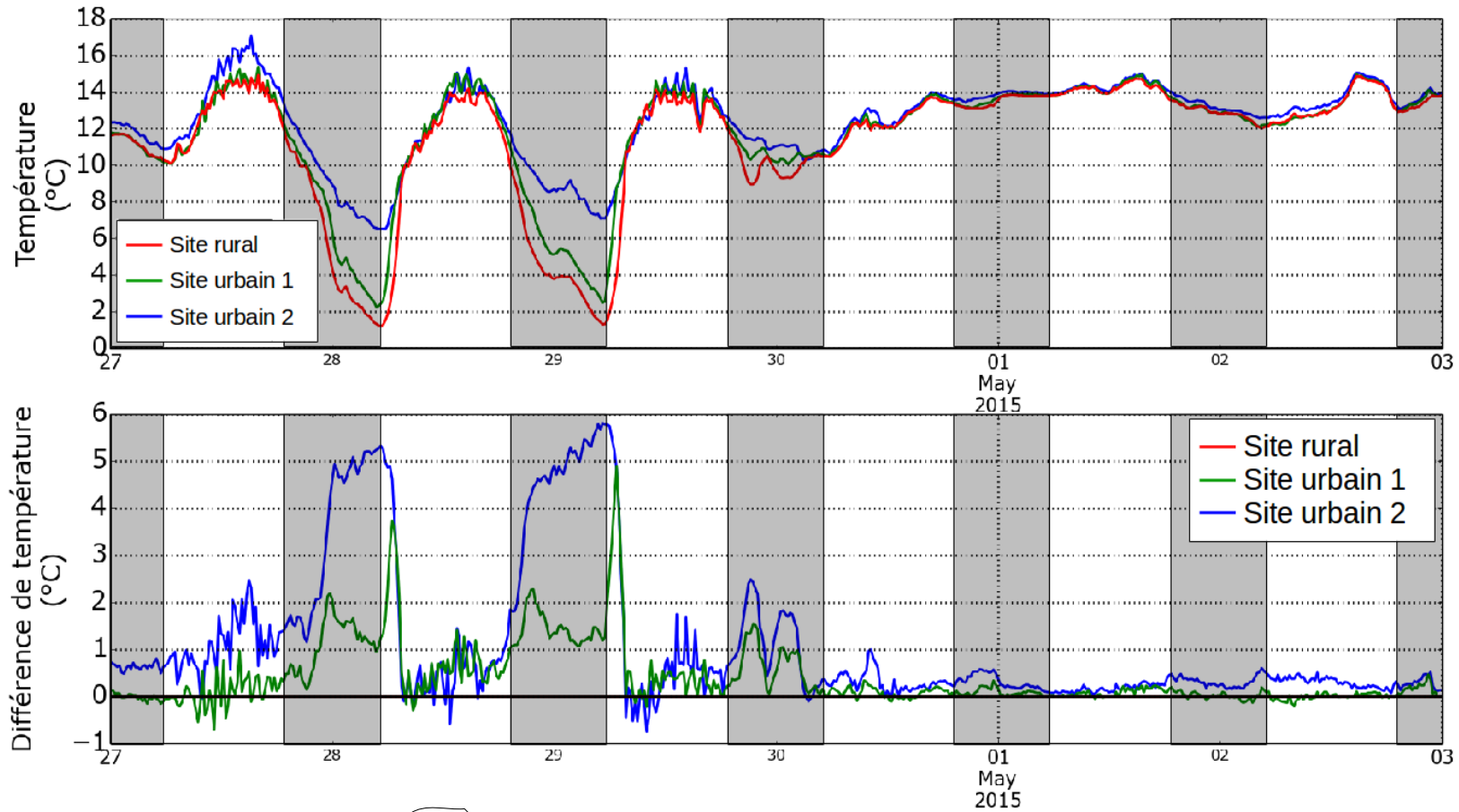
**Des variations au sein du cycle diurne**

## Reconstitution du signal de température d'air

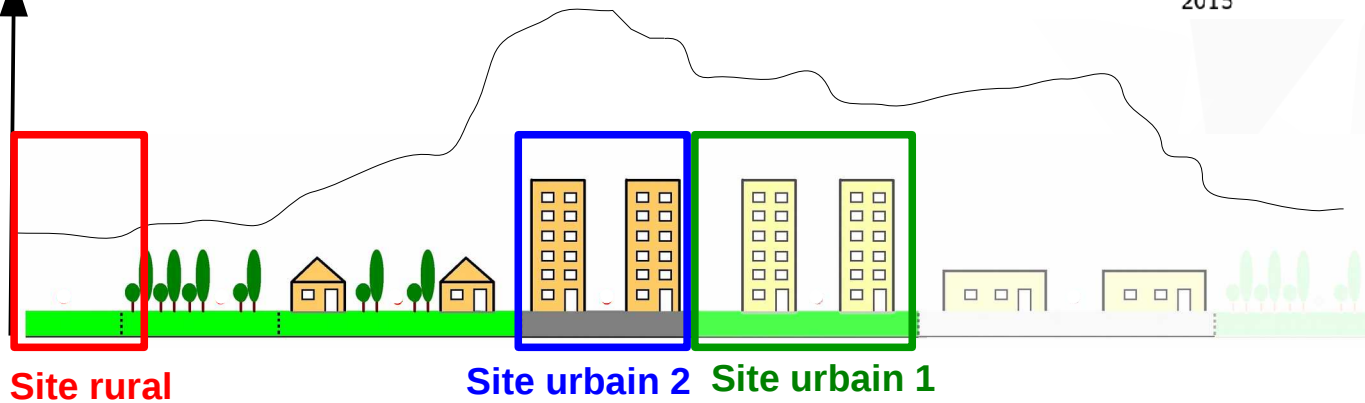




## Reconstitution du signal de température d'air

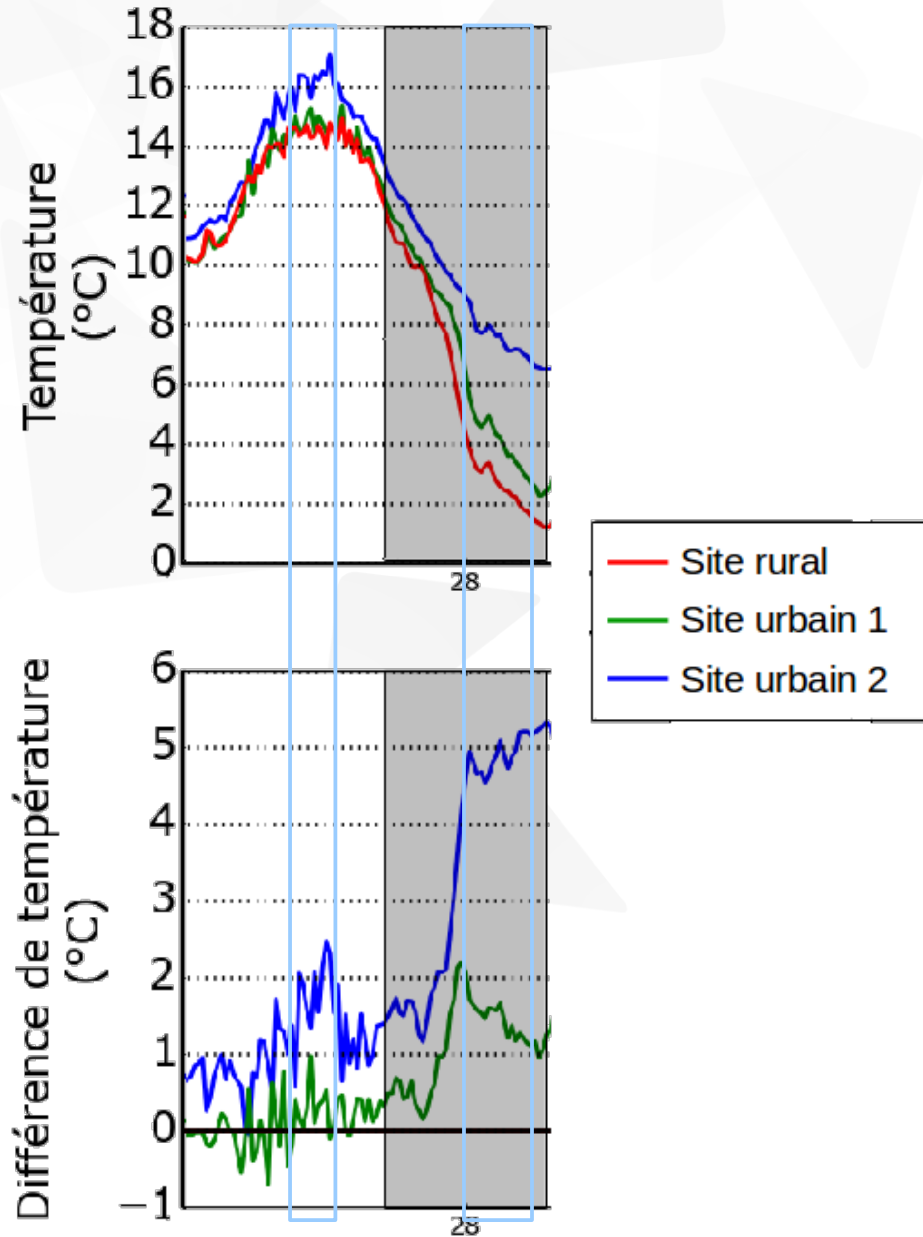


Température de l'air



# Méthodologie

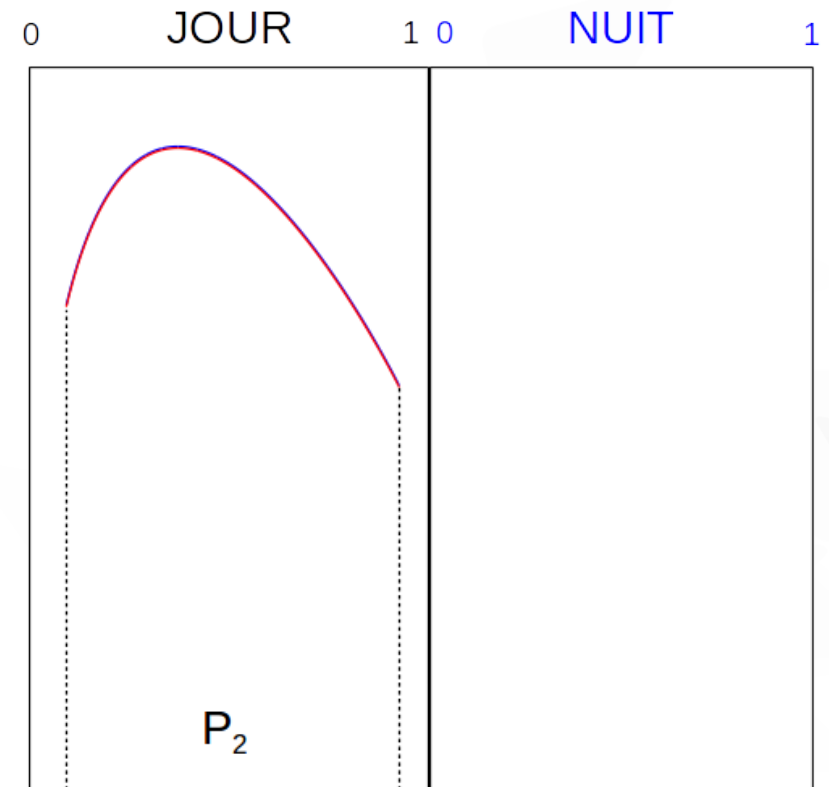
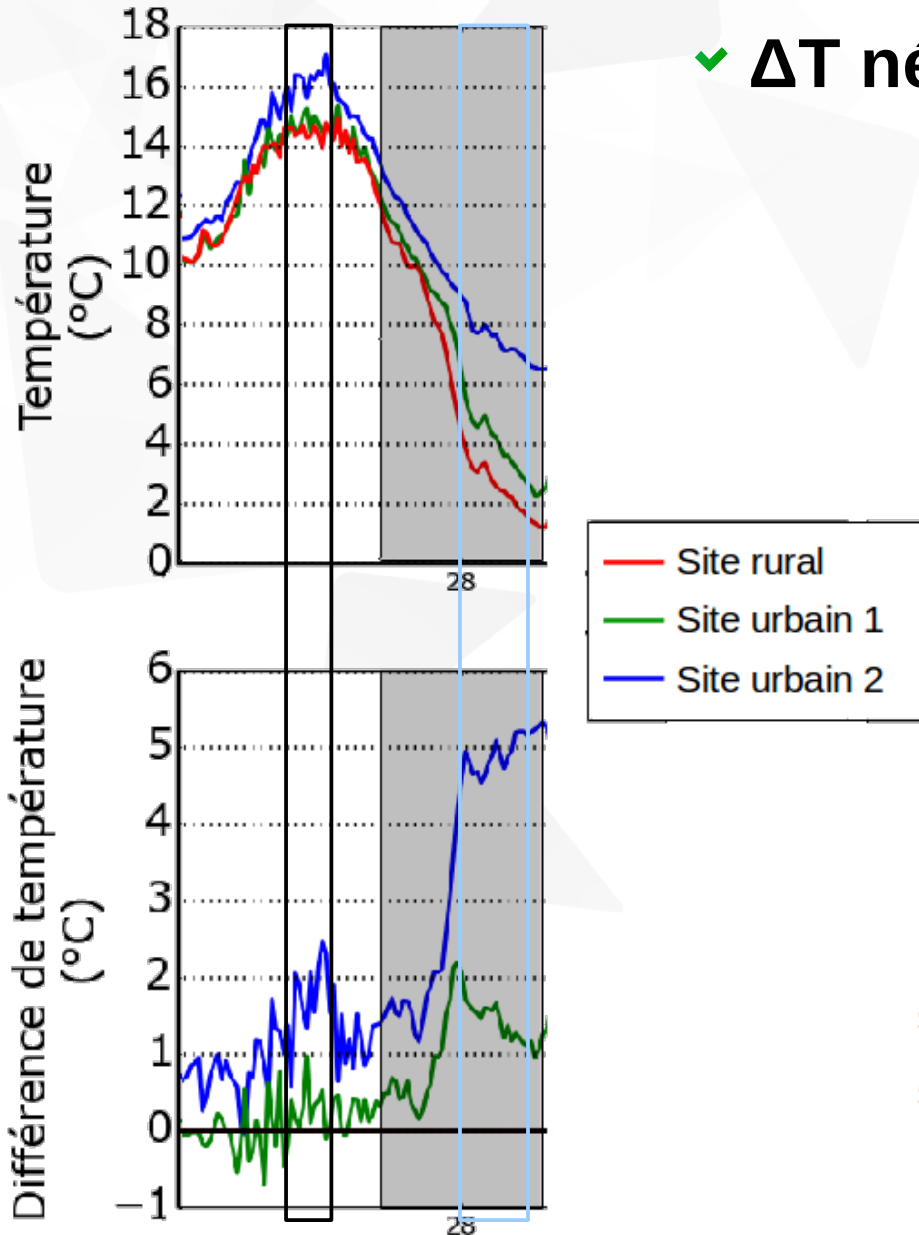
## Méthodologie générale



# Méthodologie

## Méthodologie générale

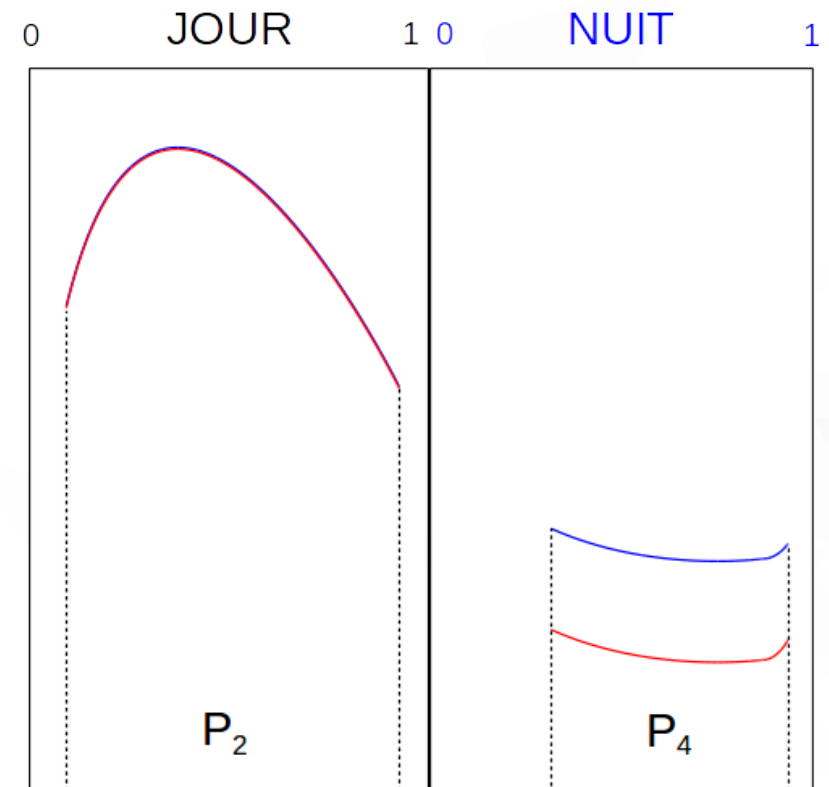
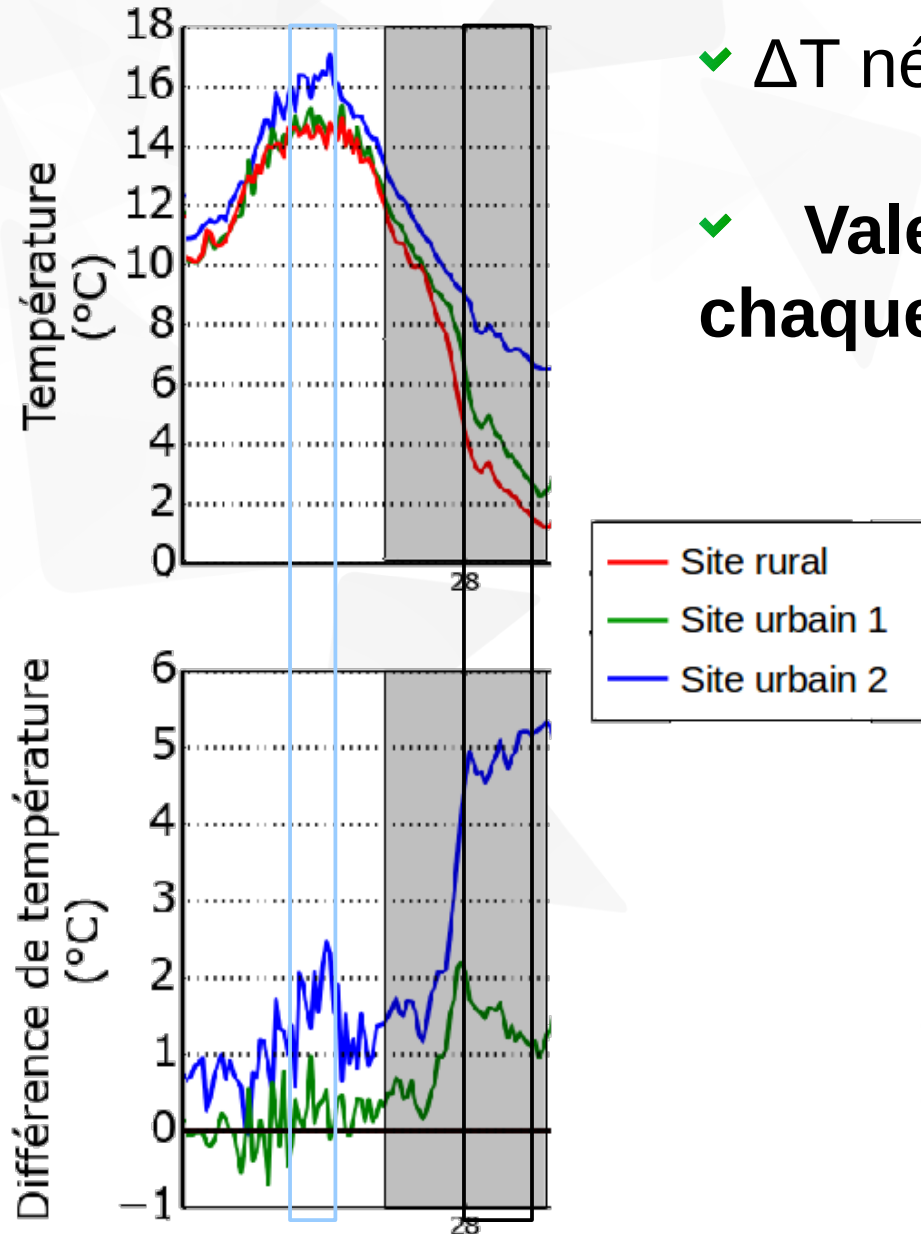
✓  $\Delta T$  négligeable



# Méthodologie

## Méthodologie générale

- ✓  $\Delta T$  négligeable
- ✓ Valeur de  $\Delta T$  calculée pour chaque station  $i$  et chaque jour

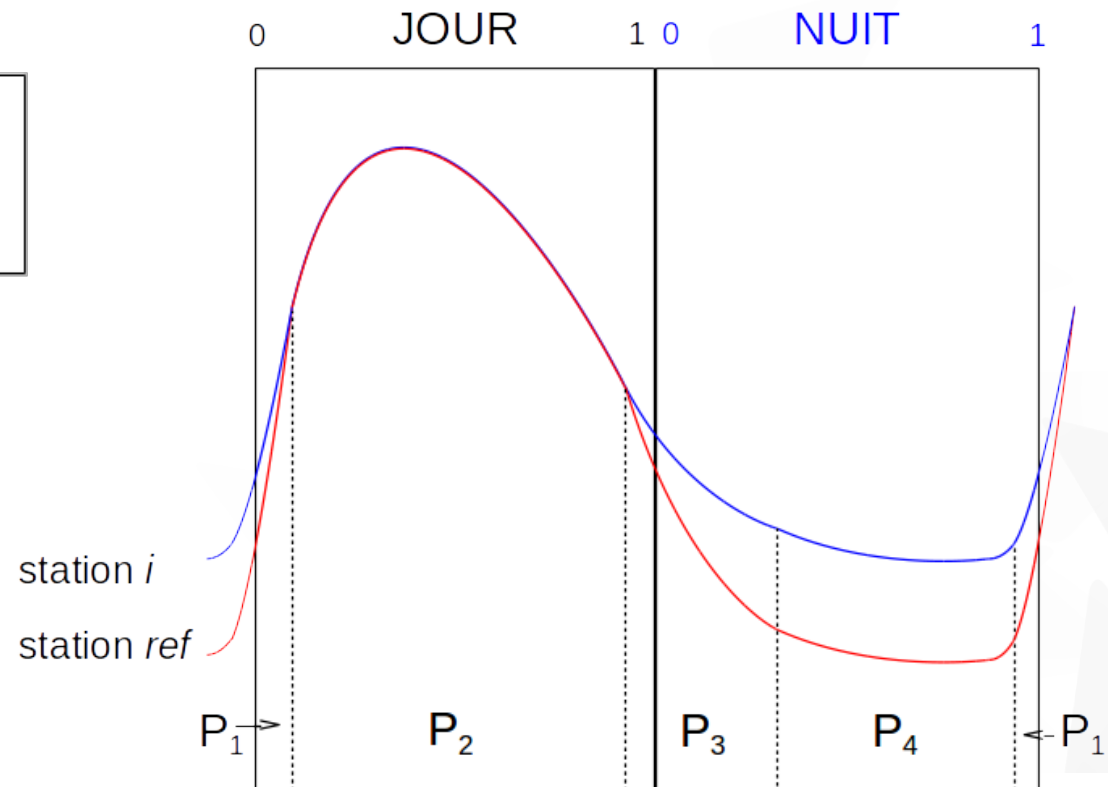
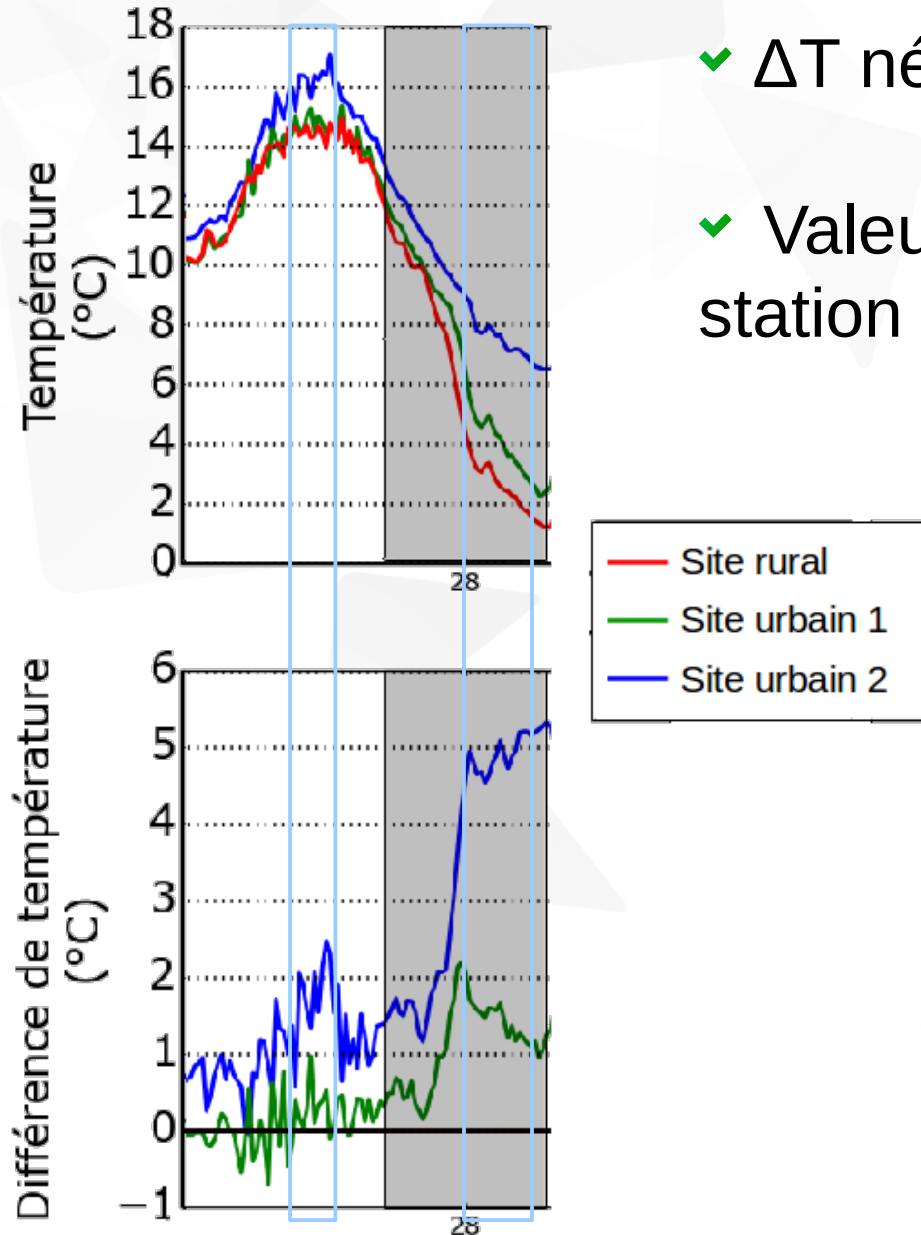


station  $i$   
station  $ref$

# Méthodologie

## Méthodologie générale

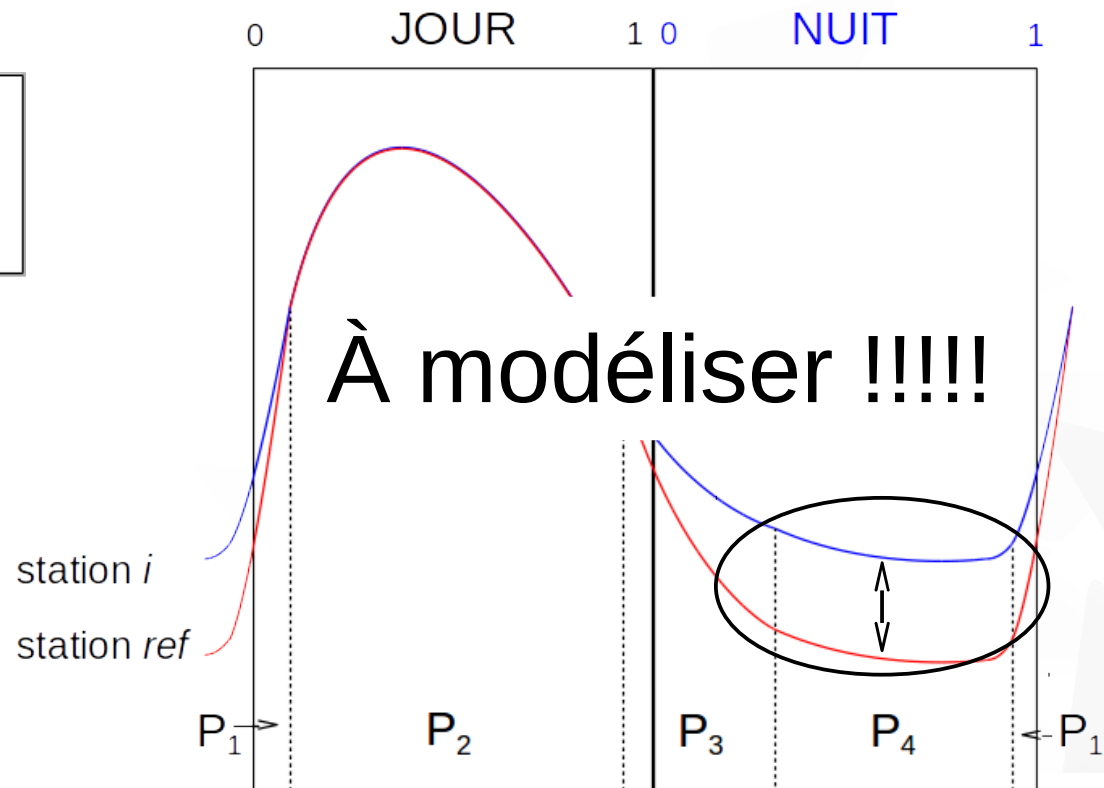
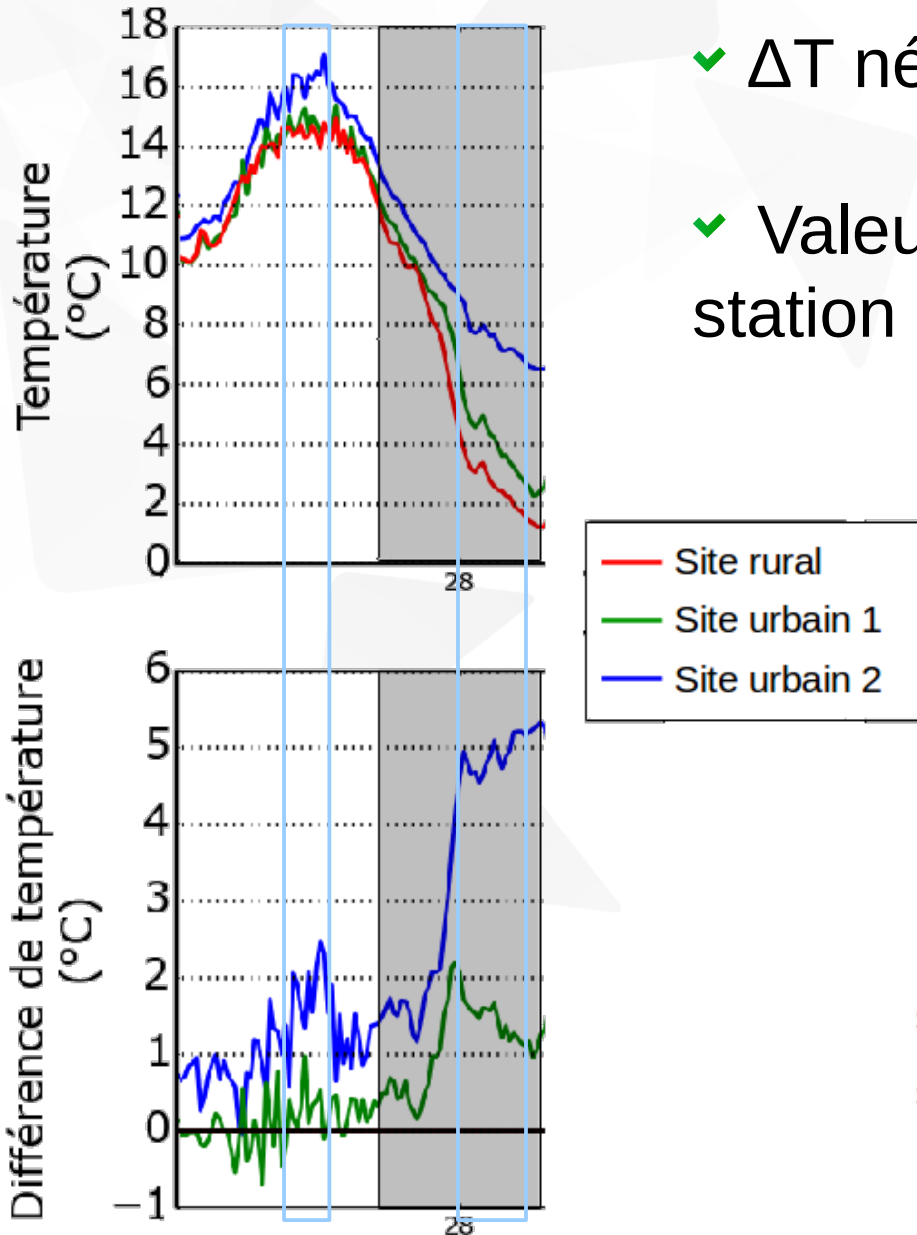
- ✓  $\Delta T$  négligeable
- ✓ Valeur de  $\Delta T$  calculée pour chaque station  $i$  et chaque jour



# Méthodologie

## Méthodologie générale

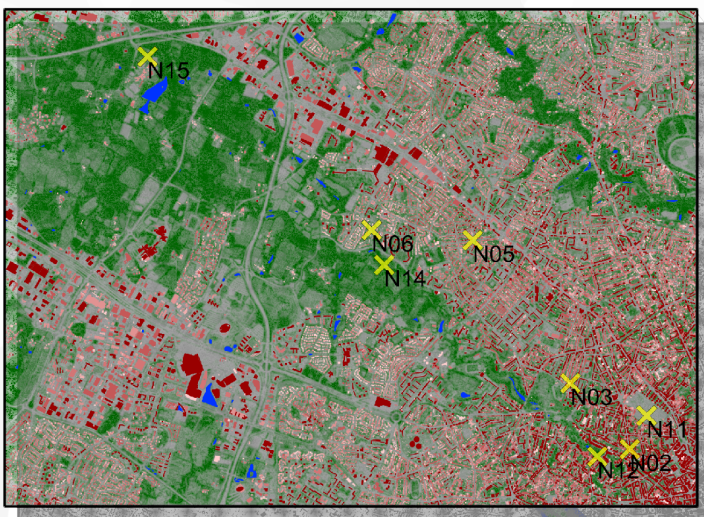
- ✓  $\Delta T$  négligeable
- ✓ Valeur de  $\Delta T$  calculée pour chaque station  $i$  et chaque jour



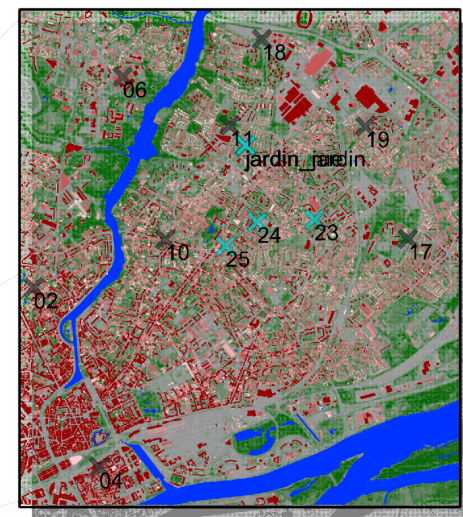


# Méthodologie

## Sites de mesure



MF\_Nort\_s\_e



MF\_Boug

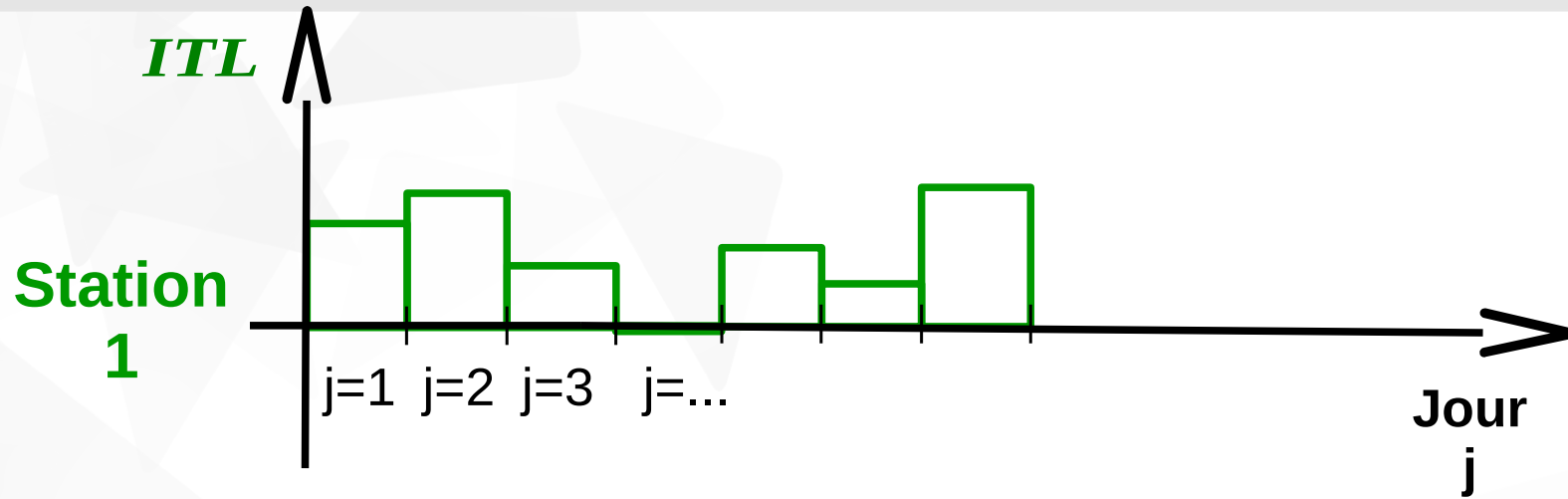
- sol artificiel → végétation
- bâtiment bas → bâtiment haut
- surface d'eau
- station URBIO
- station FluxSAP
- station TRH
- station Météo-France



10 kms

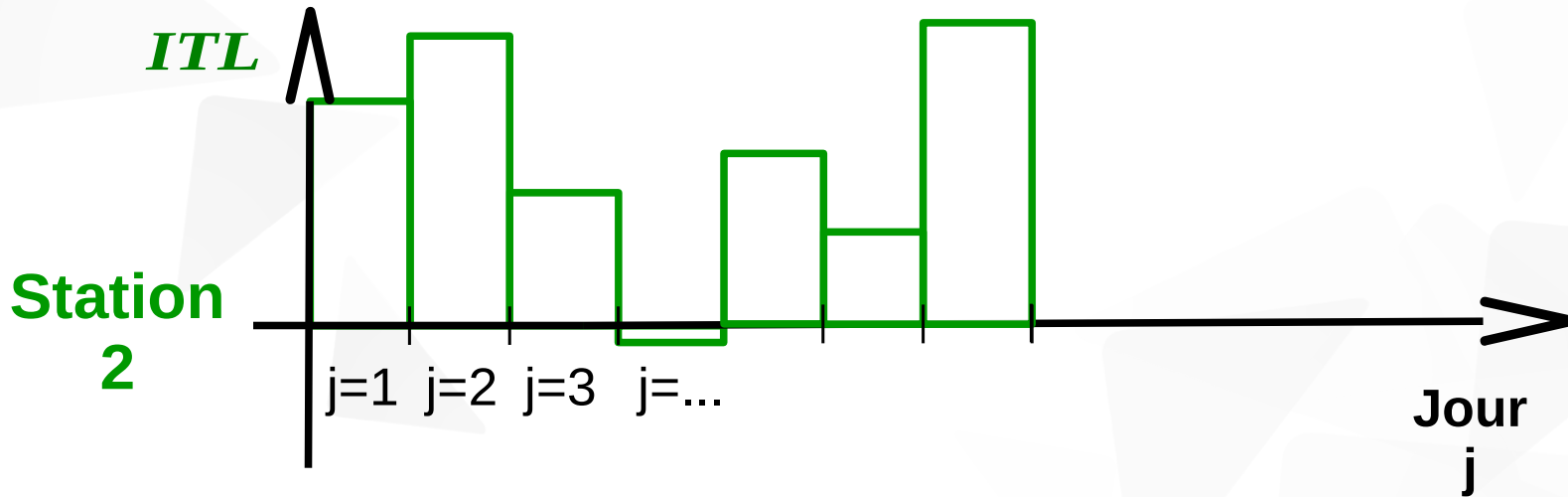
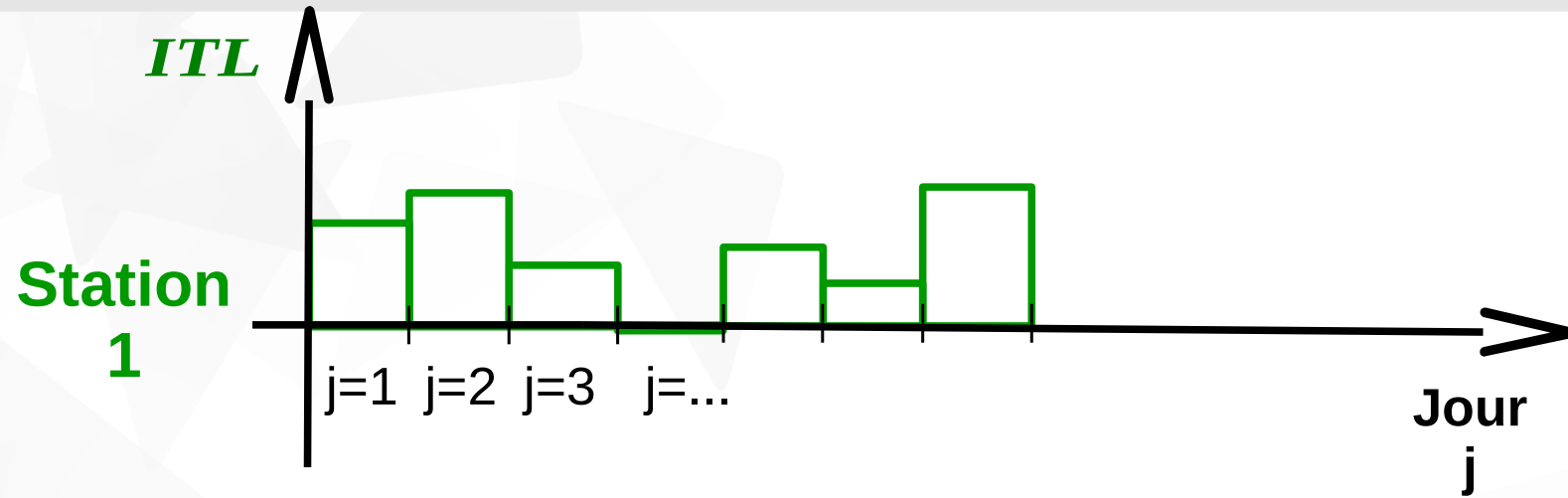
# Méthodologie

## Méthodologie générale



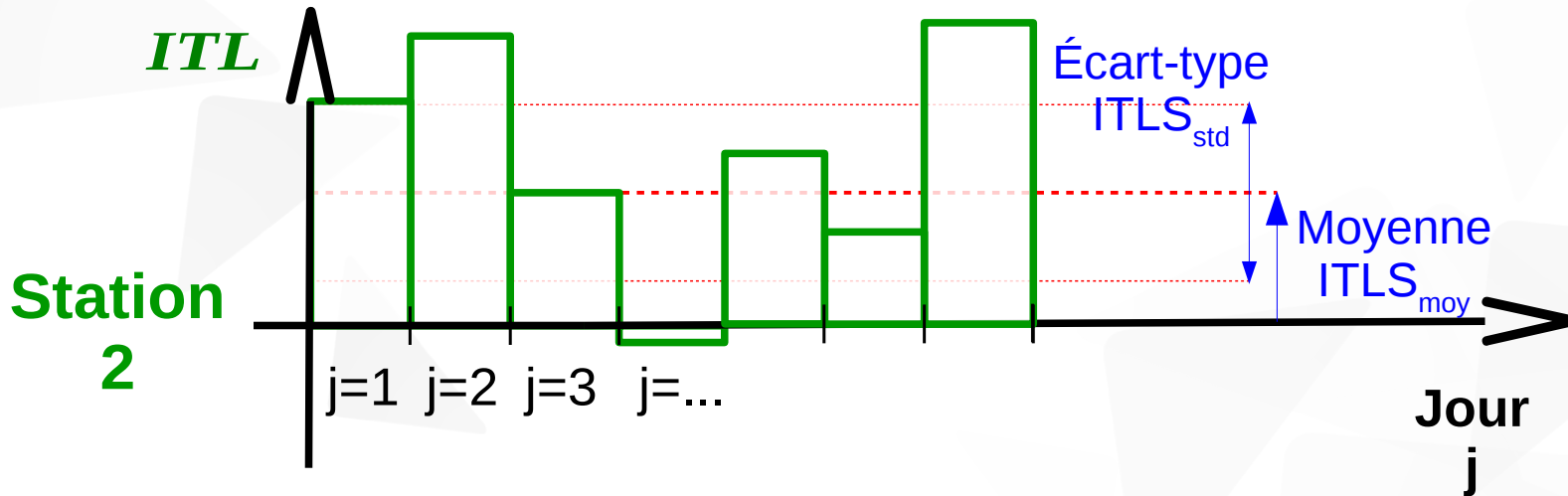
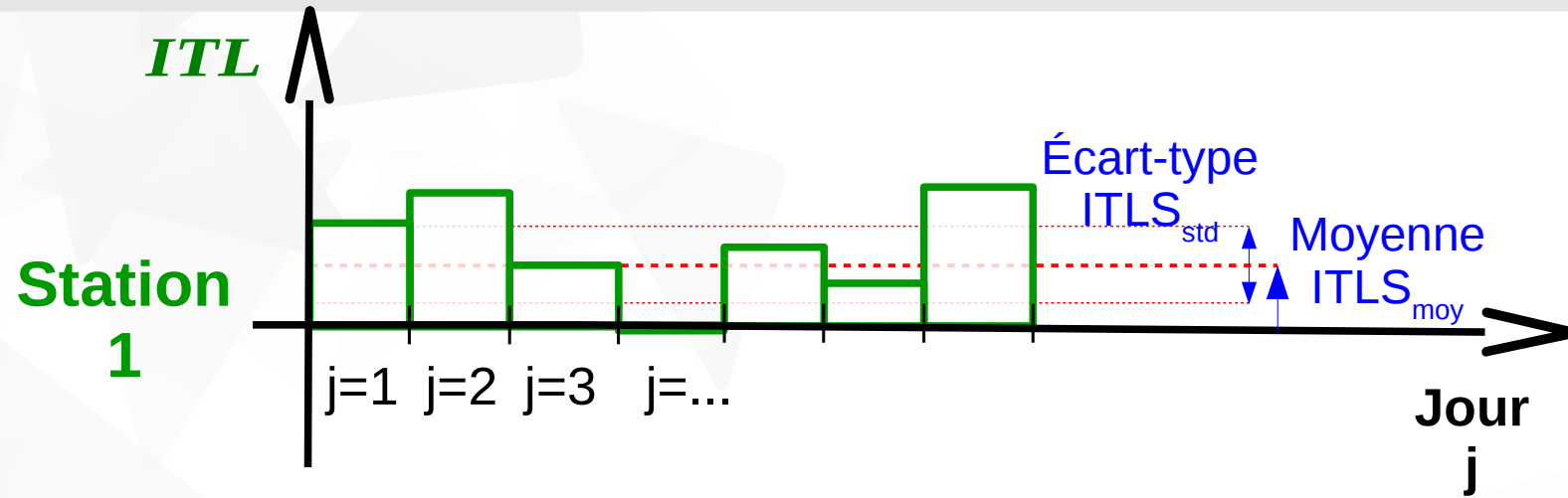
# Méthodologie

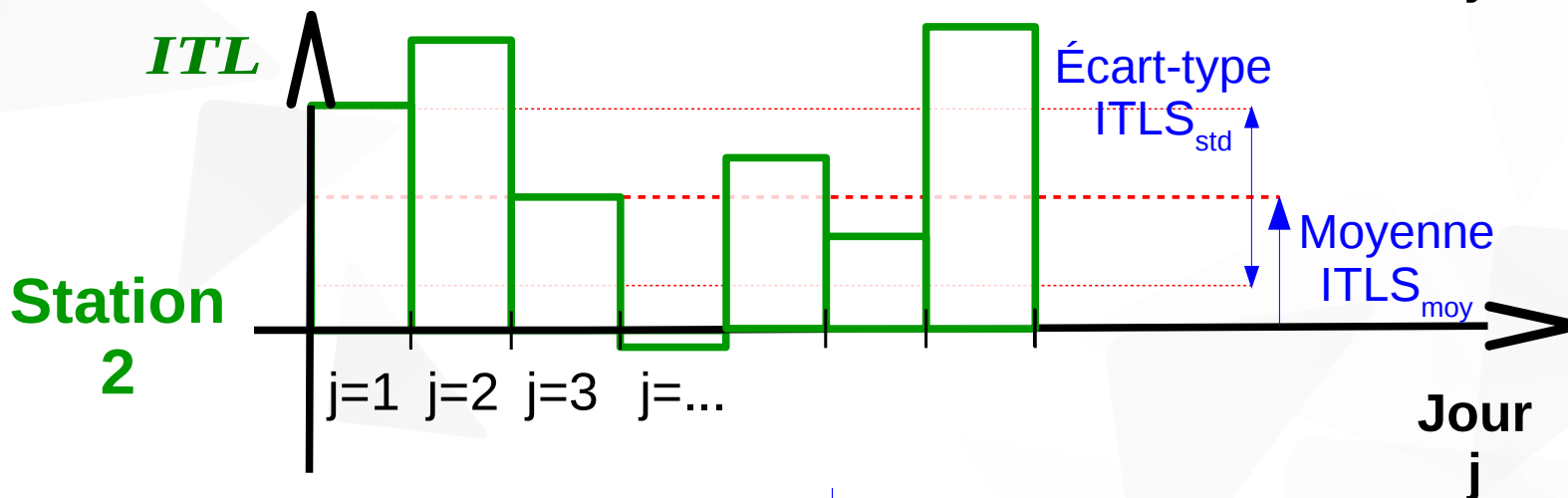
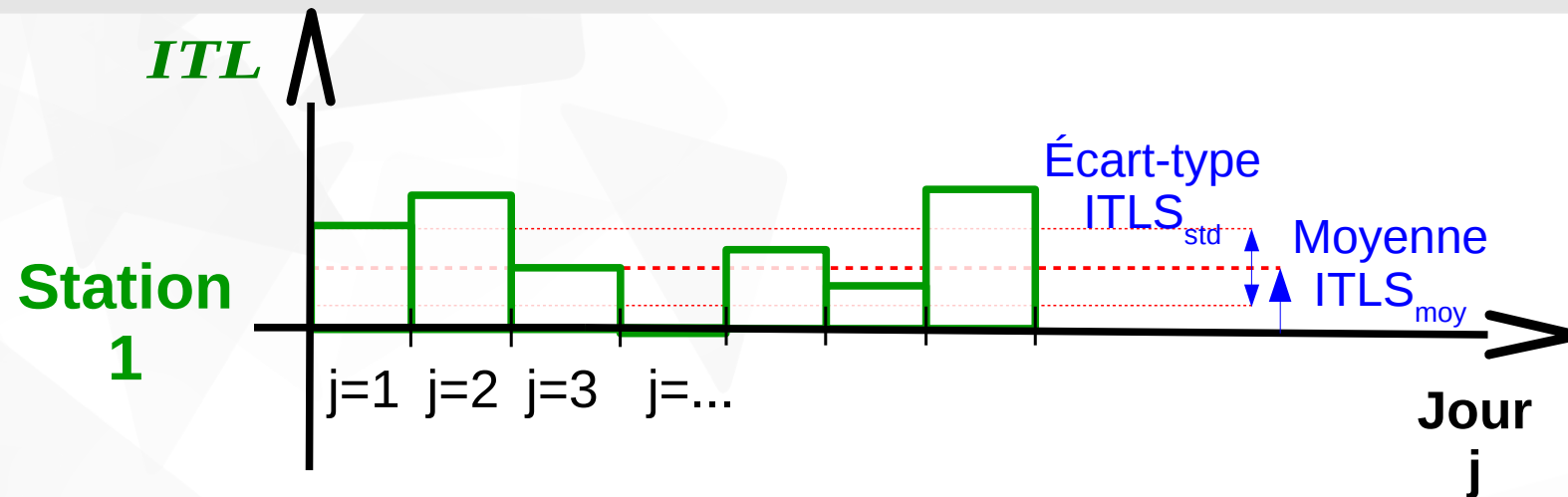
## Méthodologie générale



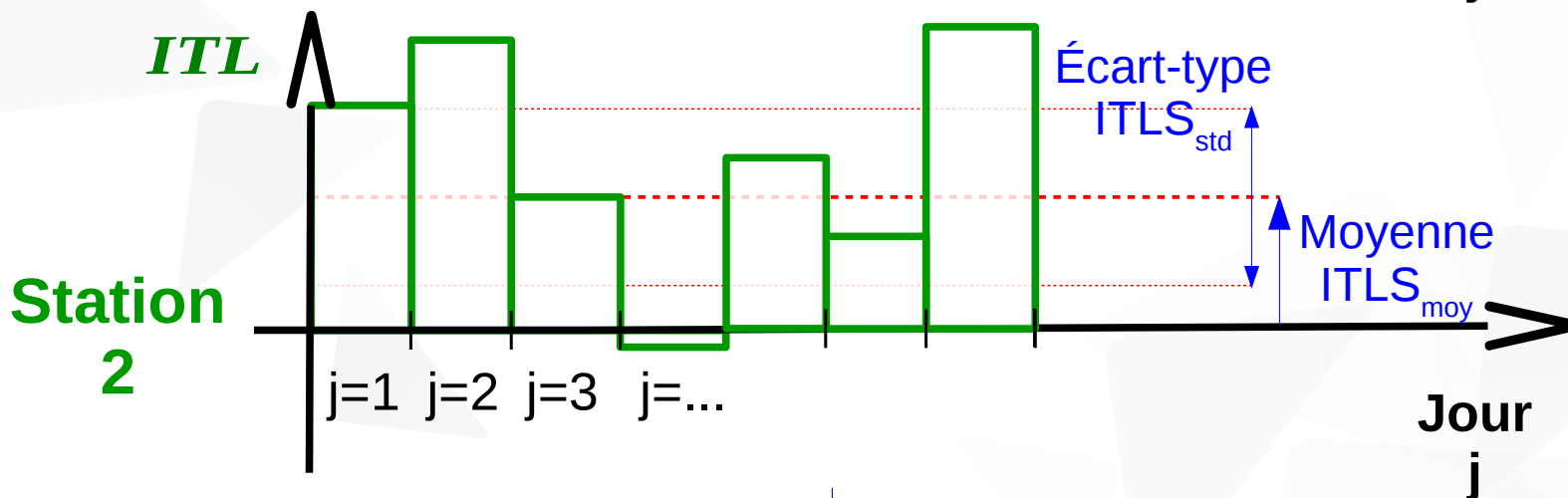
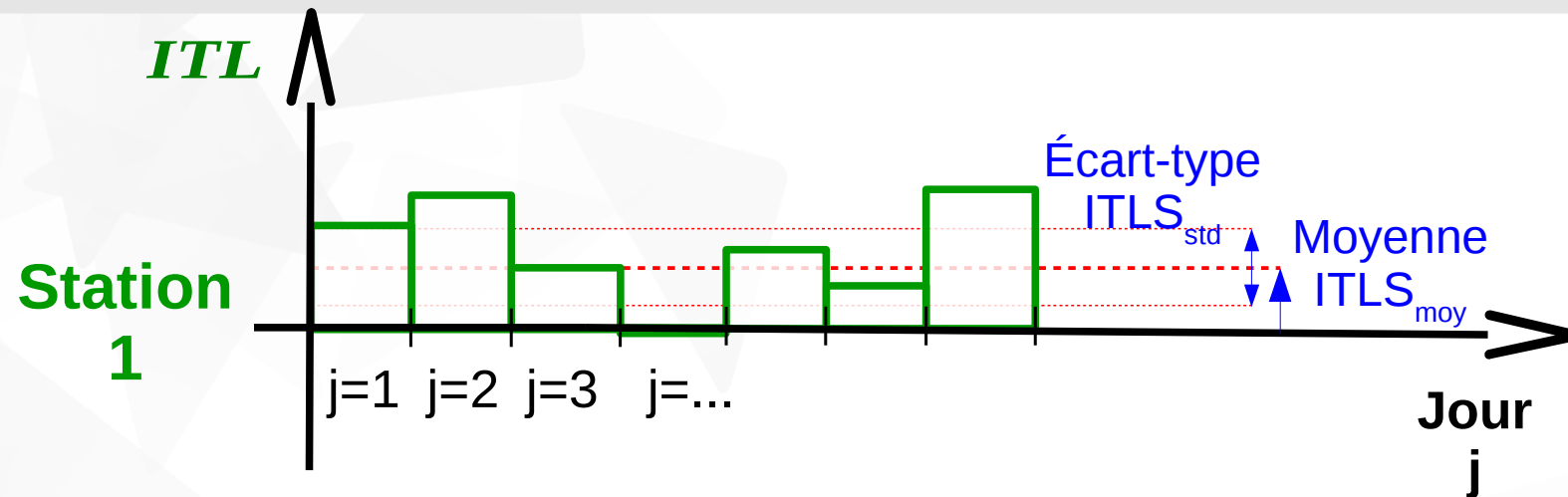
# Méthodologie

## Méthodologie générale





Station	ITLS <sub>moy</sub>	ITLS <sub>std</sub>
1	3,02	1,23
2	1,80	0,24



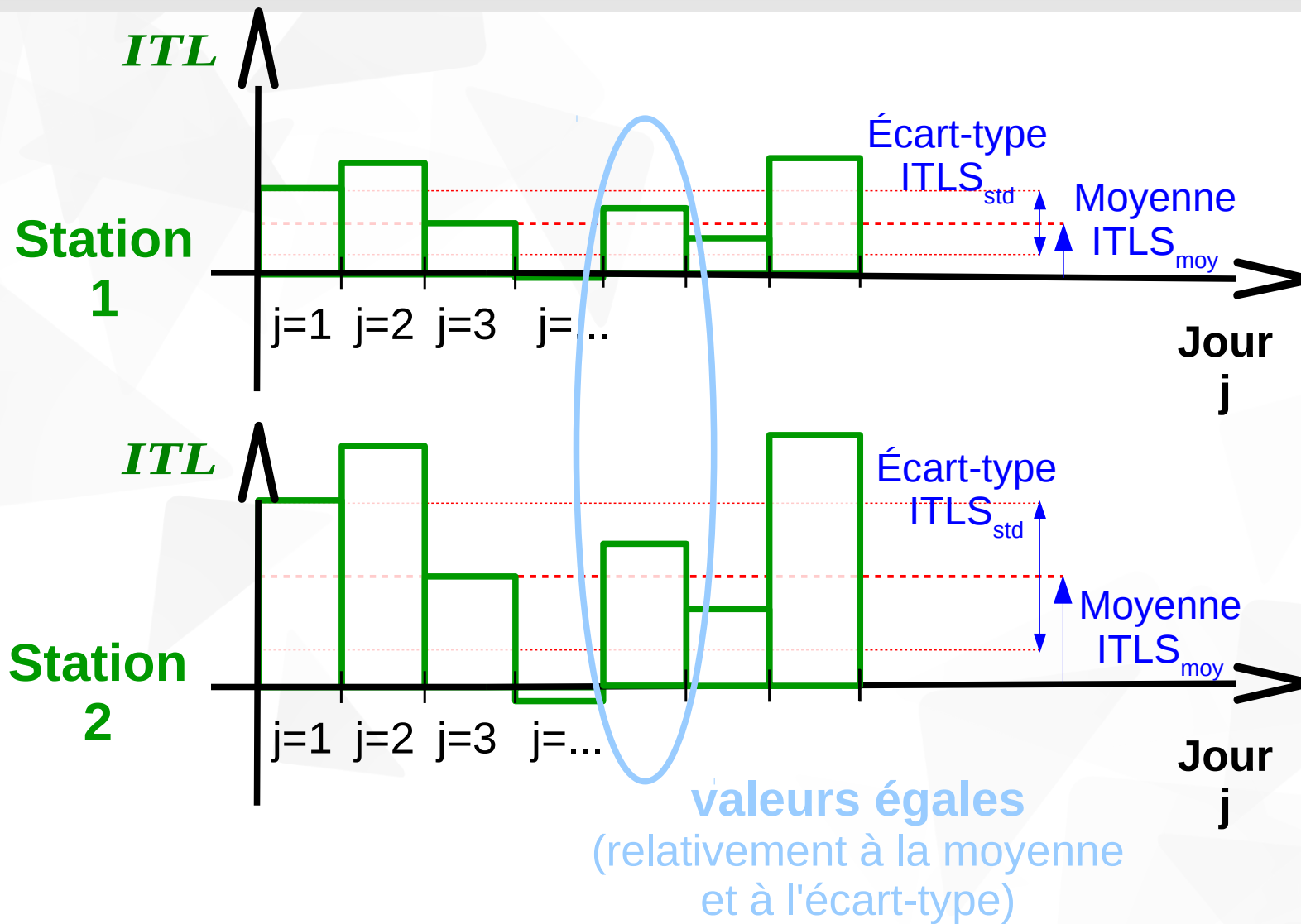
**Variations spatiales !!**

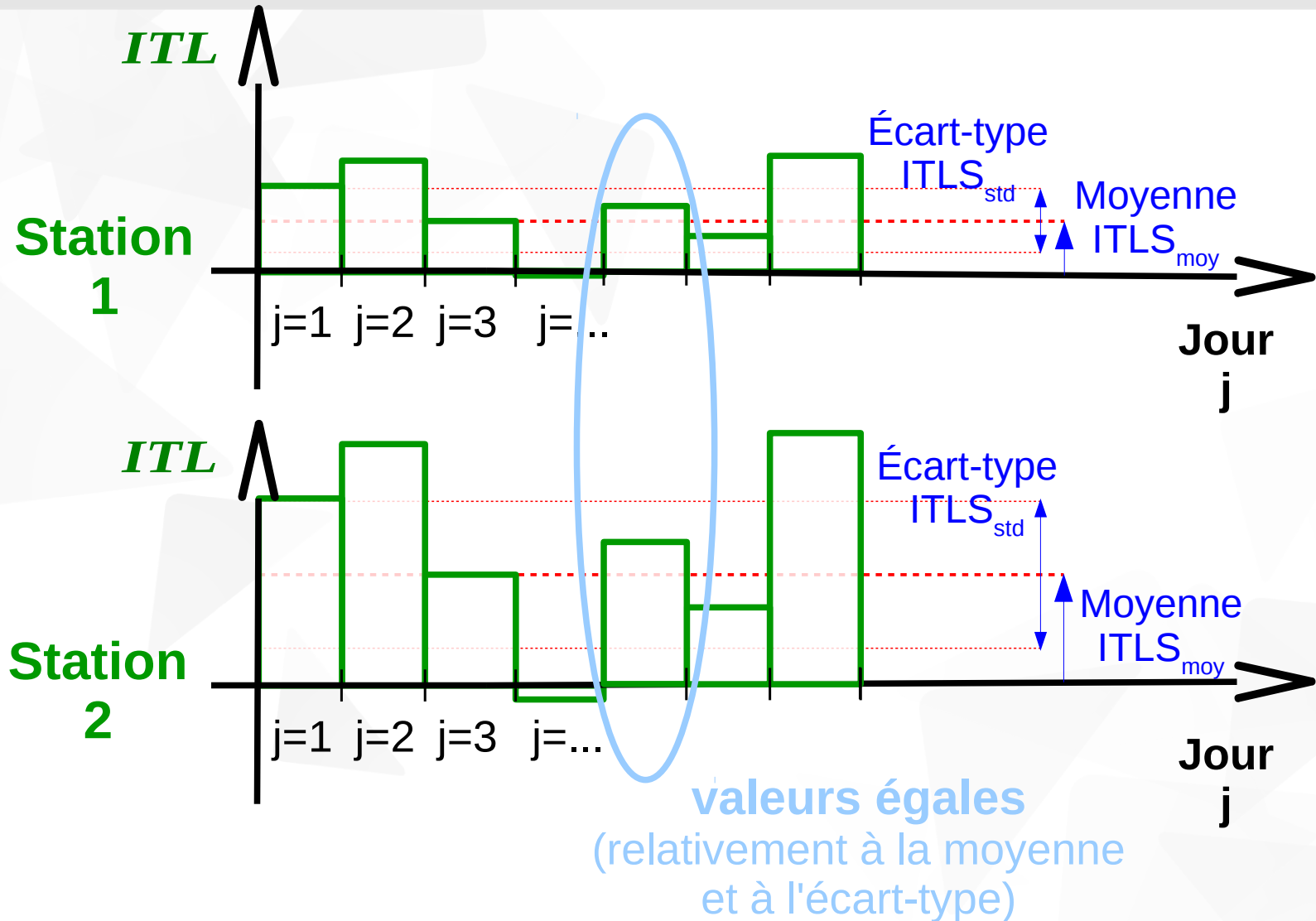
Station	ITLS <sub>moy</sub>	ITLS <sub>std</sub>
1	3,02	1,23
2	1,80	0,24



# Méthodologie

## Méthodologie générale

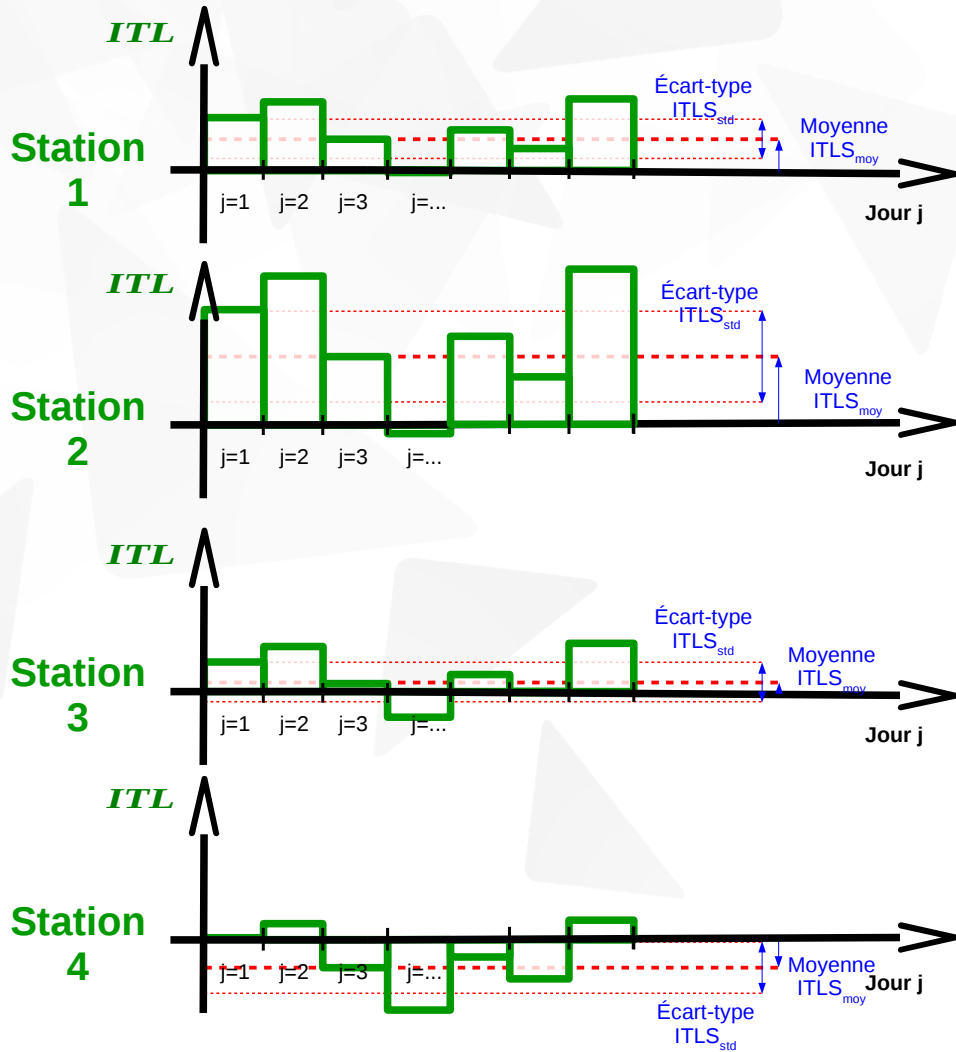




changement de variable : 
$$ITLT = \frac{ITL - ITLS_{moy}}{ITLS_{std}}$$

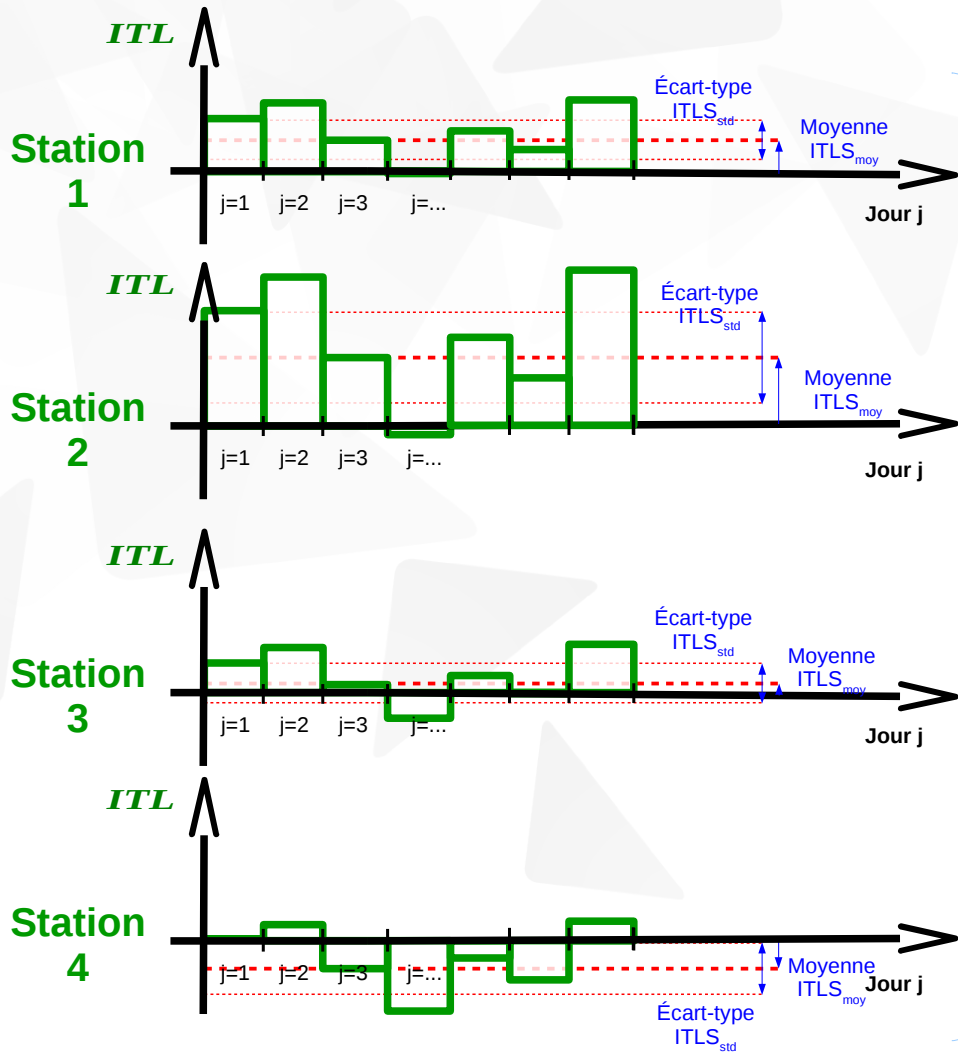
# Méthodologie

## Méthodologie générale

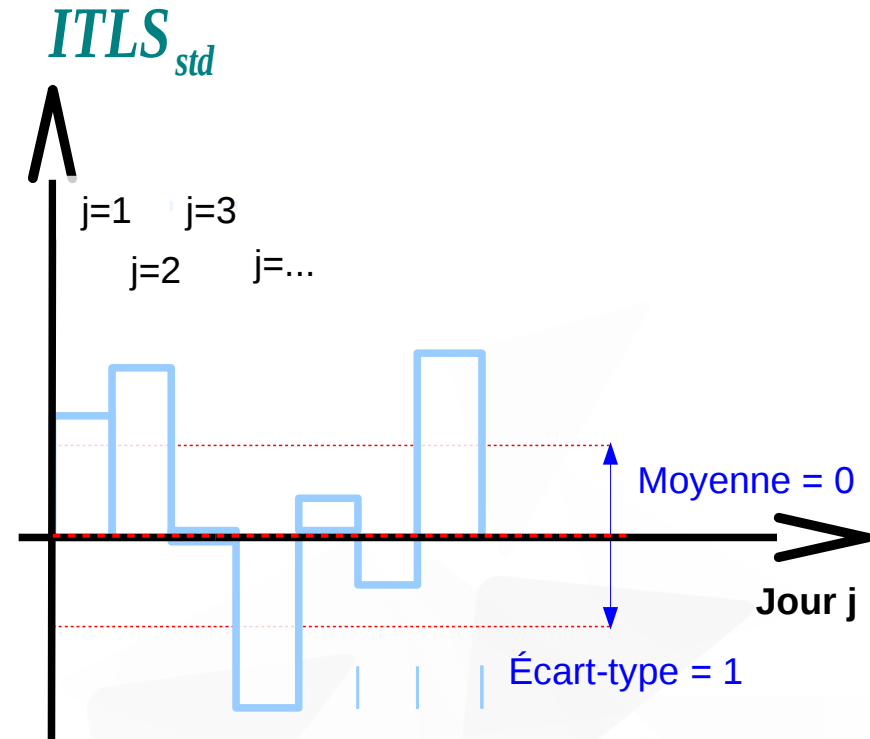


# Méthodologie

## Méthodologie générale

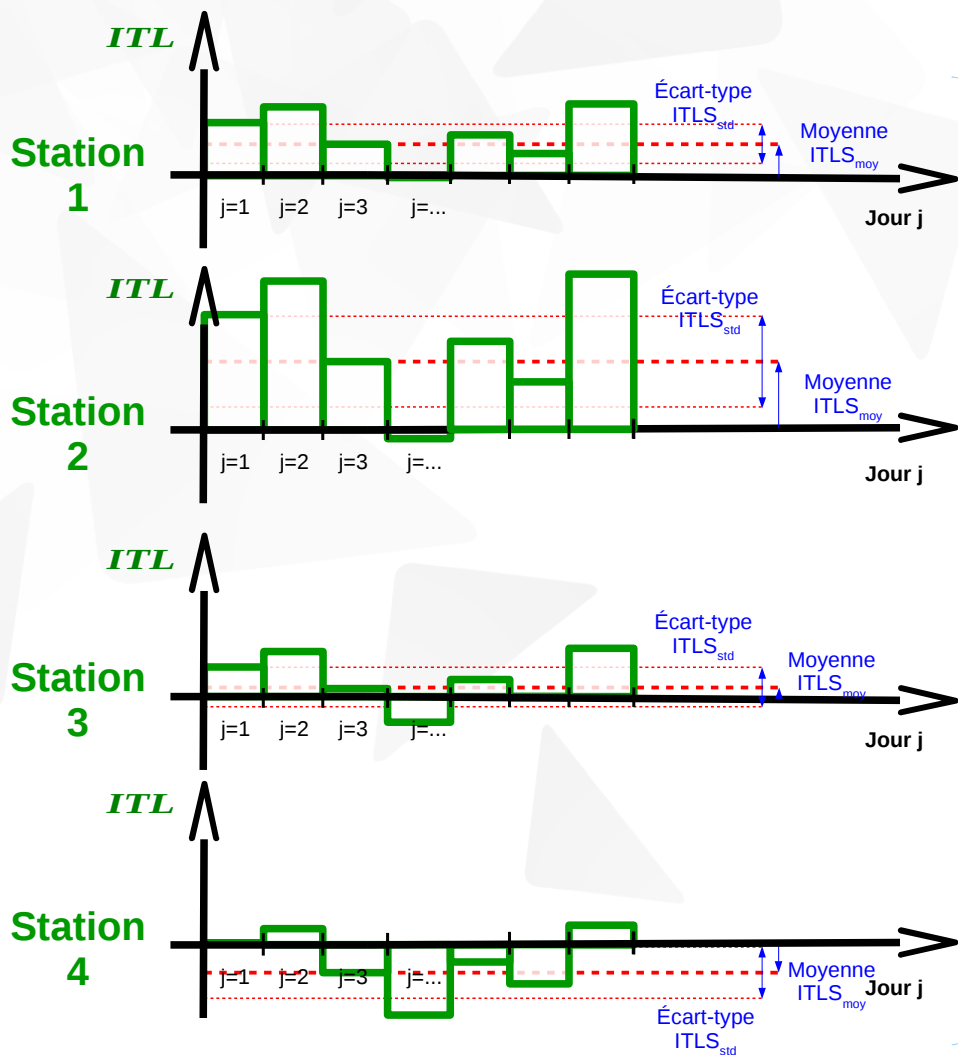


$$ITLT = \frac{ITL - ITLS_{moy}}{ITLS_{std}}$$

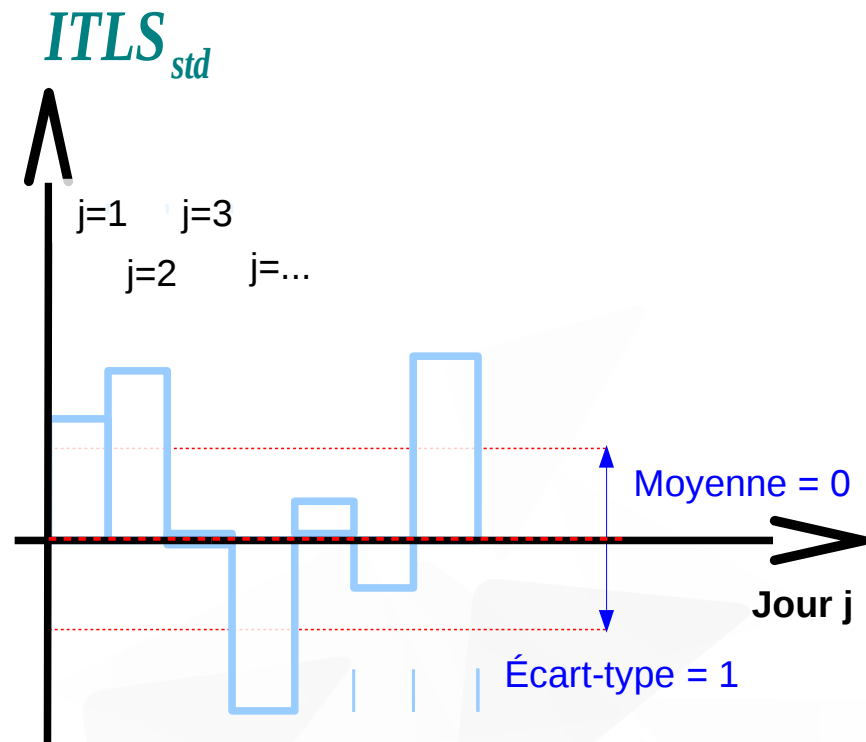


# Méthodologie

## Méthodologie générale



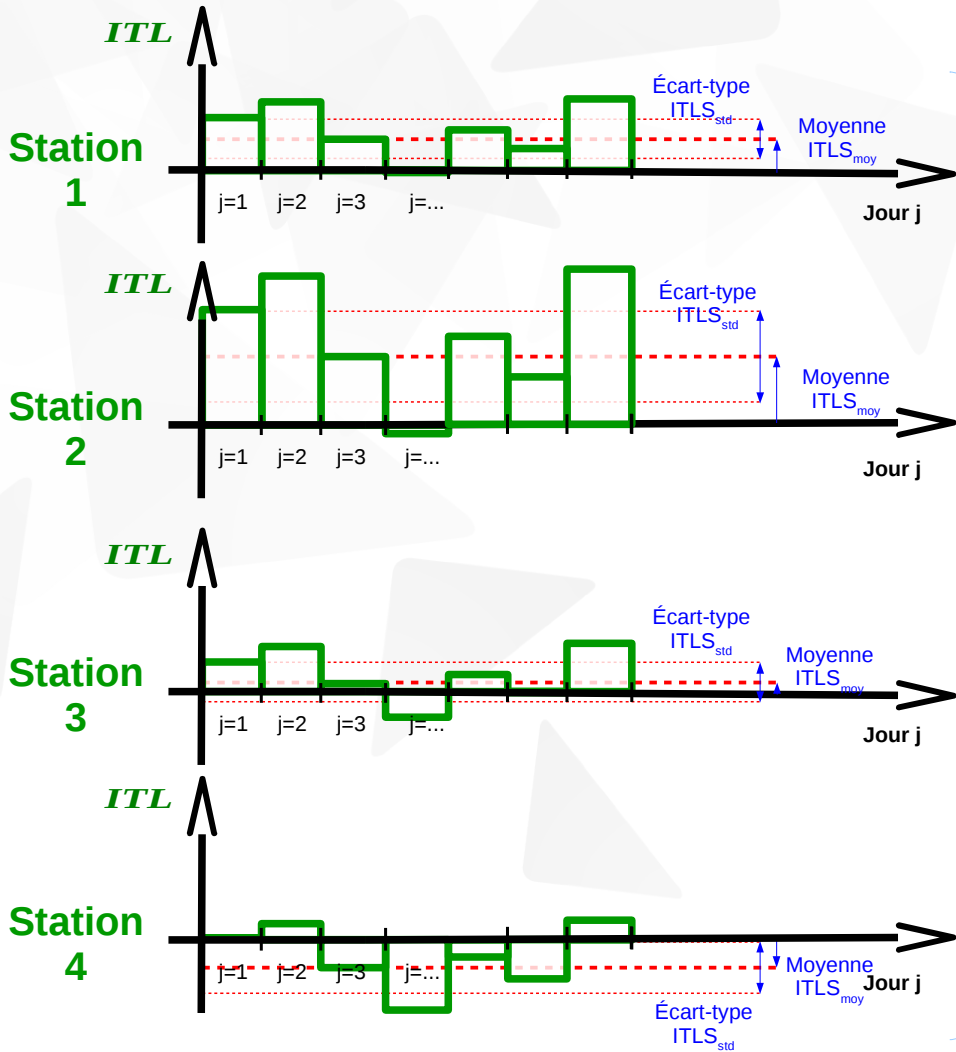
$$ITLT = \frac{ITL - ITLS_{moy}}{ITLS_{std}}$$



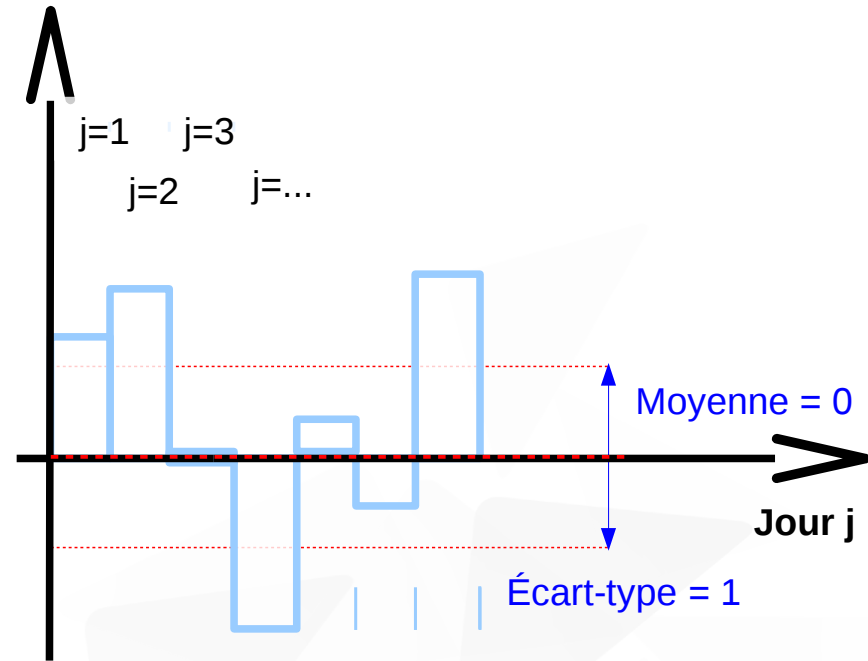
Jour	ITLT
1	1,22
2	1,54
...	...

# Méthodologie

## Méthodologie générale



$$ITLT = \frac{ITL - ITLS_{moy}}{ITLS_{std}}$$



Variations temporelles !!

Jour	ITLT
1	1,22
2	1,54
...	...



# Méthodologie

## Méthodologie générale

<b>Station</b>	<b>ITLS<sub>moy</sub></b>	<b>ITLS<sub>std</sub></b>
<b>1</b>	3,02	1,23
<b>2</b>	1,80	0,24
<b>3</b>	2,15	1,03
<b>...</b>	<b>...</b>	<b>...</b>

# Méthodologie

## Méthodologie générale

<b>Station</b>	<b>ITLS<sub>moy</sub></b>	<b>ITLS<sub>std</sub></b>	<b>D<sub>surf</sub></b>	<b>D<sub>bat</sub></b>	<b>...</b>
<b>1</b>	3,02	1,23	2,80	0,62	70
<b>2</b>	1,80	0,24	1,51	0,32	123
<b>3</b>	2,15	1,03	1,35	0,14	128
<b>...</b>	<b>...</b>	<b>...</b>	<b>...</b>	<b>...</b>	<b>...</b>

# Méthodologie

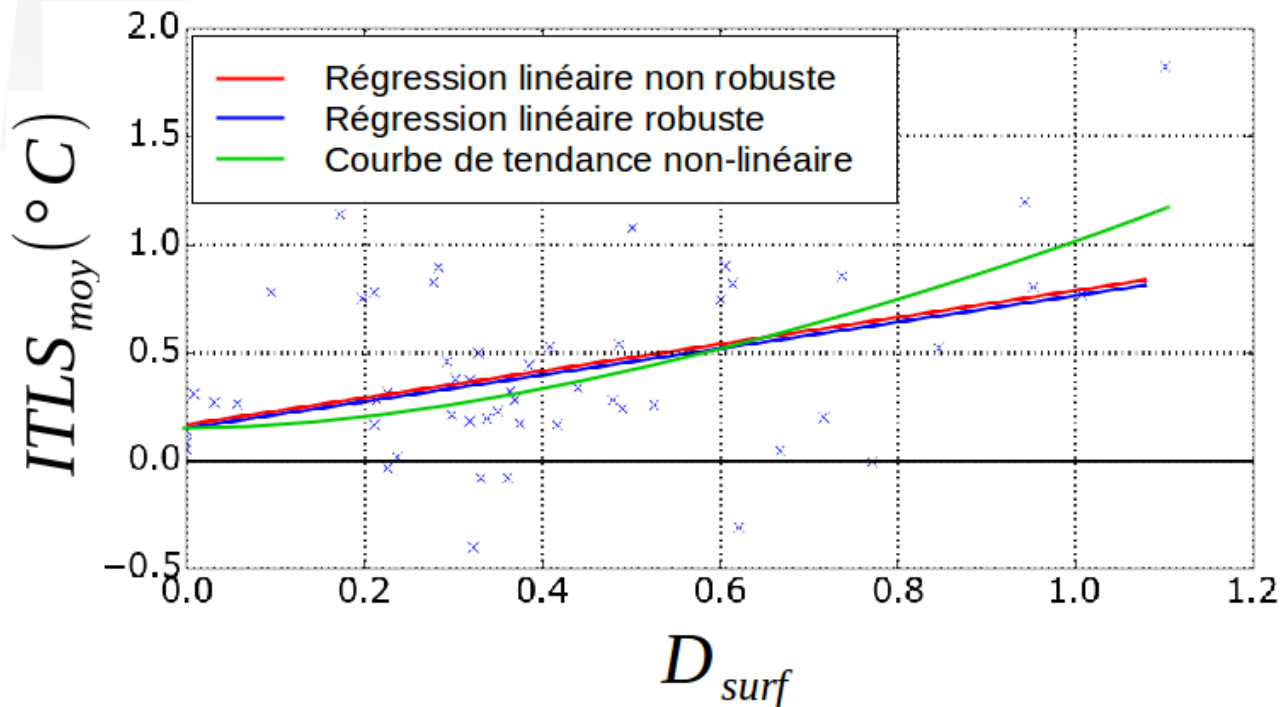
## Méthodologie générale

Station	ITLS <sub>moy</sub>	ITLS <sub>std</sub>	D <sub>surf</sub>	D <sub>bat</sub>	...
1	3,02	1,23	2,80	0,62	70
2	1,80	0,24	1,51	0,32	123
3	2,15	1,03	1,35	0,14	128
...	...	...	...	...	...

# Méthodologie

## Méthodologie générale

Station	<b>ITLS<sub>moy</sub></b>	<b>ITLS<sub>std</sub></b>	<b>D<sub>surf</sub></b>	<b>D<sub>bat</sub></b>	...
1	3,02	1,23	2,80	0,62	70
2	1,80	0,24	1,51	0,32	123
3	2,15	1,03	1,35	0,14	128
...	...	...	...	...	...



# Méthodologie

## Méthodologie générale

<b>Jour</b>	<b>ITLT</b>
<b>1</b>	3,02
<b>2</b>	1,80
<b>3</b>	2,15
<b>...</b>	<b>...</b>

# Méthodologie

## Méthodologie générale

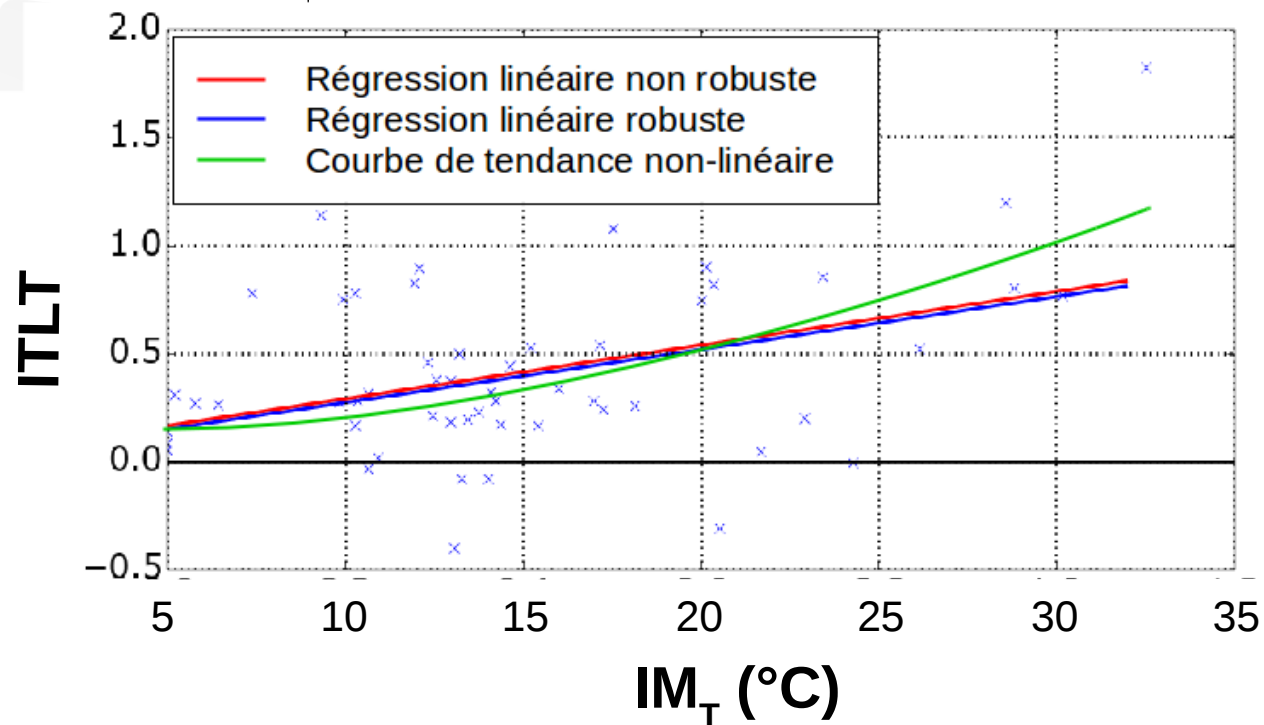
<b>Jour</b>	<b>ITLT</b>	<b>IM<sub>N</sub> (octa)</b>	<b>IM<sub>U</sub> (m/s)</b>	<b>IM<sub>T</sub> (°C)</b>	<b>...</b>
<b>1</b>	3,02	0,8	0,95	26,0	45
<b>2</b>	1,80	1,67	1,34	26,4	52
<b>3</b>	2,15	1,45	2,02	25,4	69
<b>...</b>	...	...	...	...	...

# Méthodologie

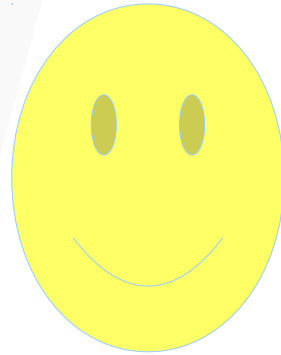
## Méthodologie générale

Jour	ITLT	IM <sub>N</sub> (octa)	IM <sub>U</sub> (m/s)	IM <sub>T</sub> (°C)	...
1	3,02	0,8	0,95	26,0	45
2	1,80	1,67	1,34	26,4	52
3	2,15	1,45	2,02	25,4	69
...	...	...	...	...	...

Jour	ITLT	IM <sub>N</sub> (octa)	IM <sub>U</sub> (m/s)	IM <sub>T</sub> (°C)	...
1	3,02	0,8	0,95	26,0	45
2	1,80	1,67	1,34	26,4	52
3	2,15	1,45	2,02	25,4	69
...	...	...	...	...	...

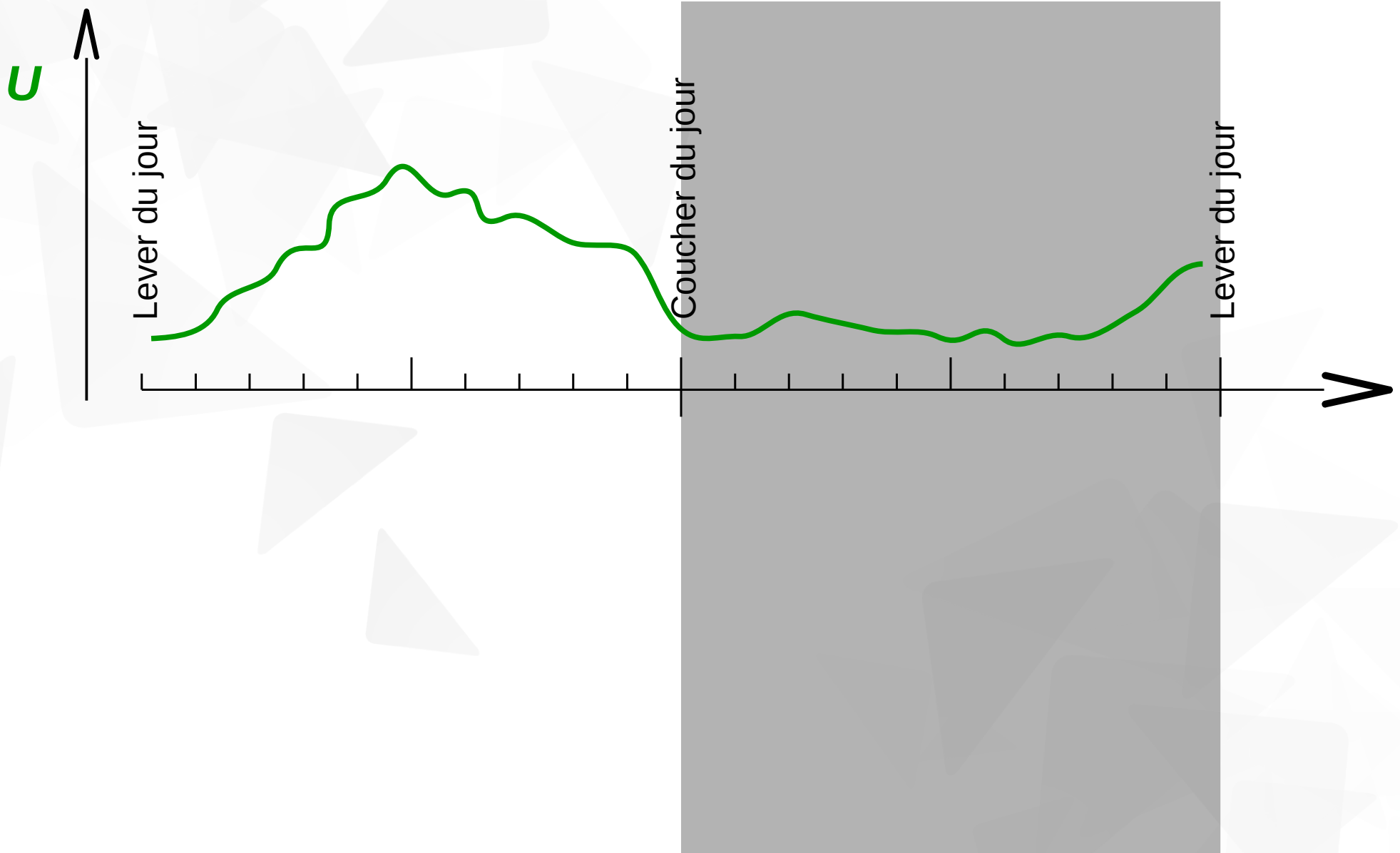






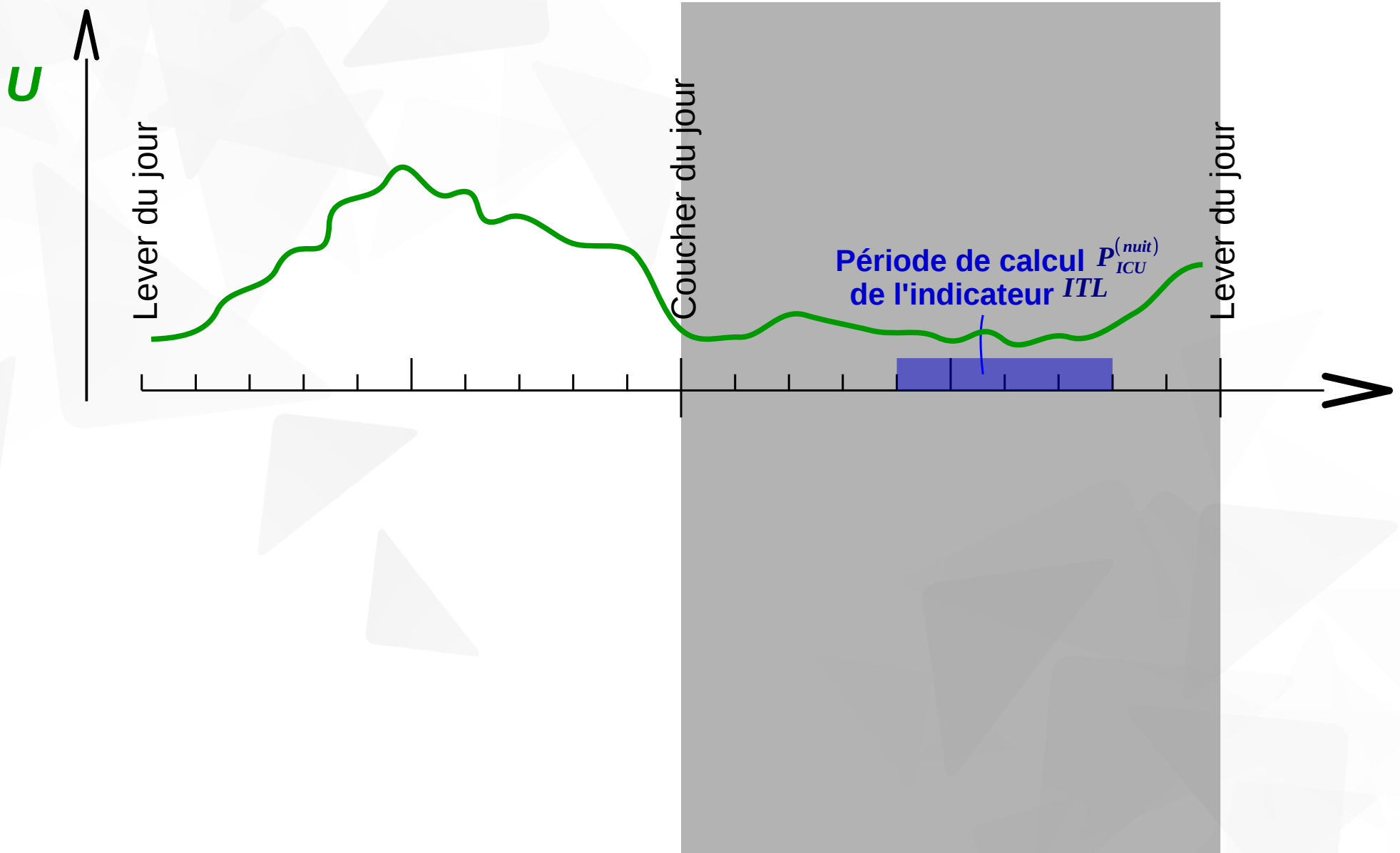
- ✓ Super... Mais c'est quoi tes indicateurs géographiques et tes indicateurs météorologiques...

## Calcul des indicateurs météorologiques



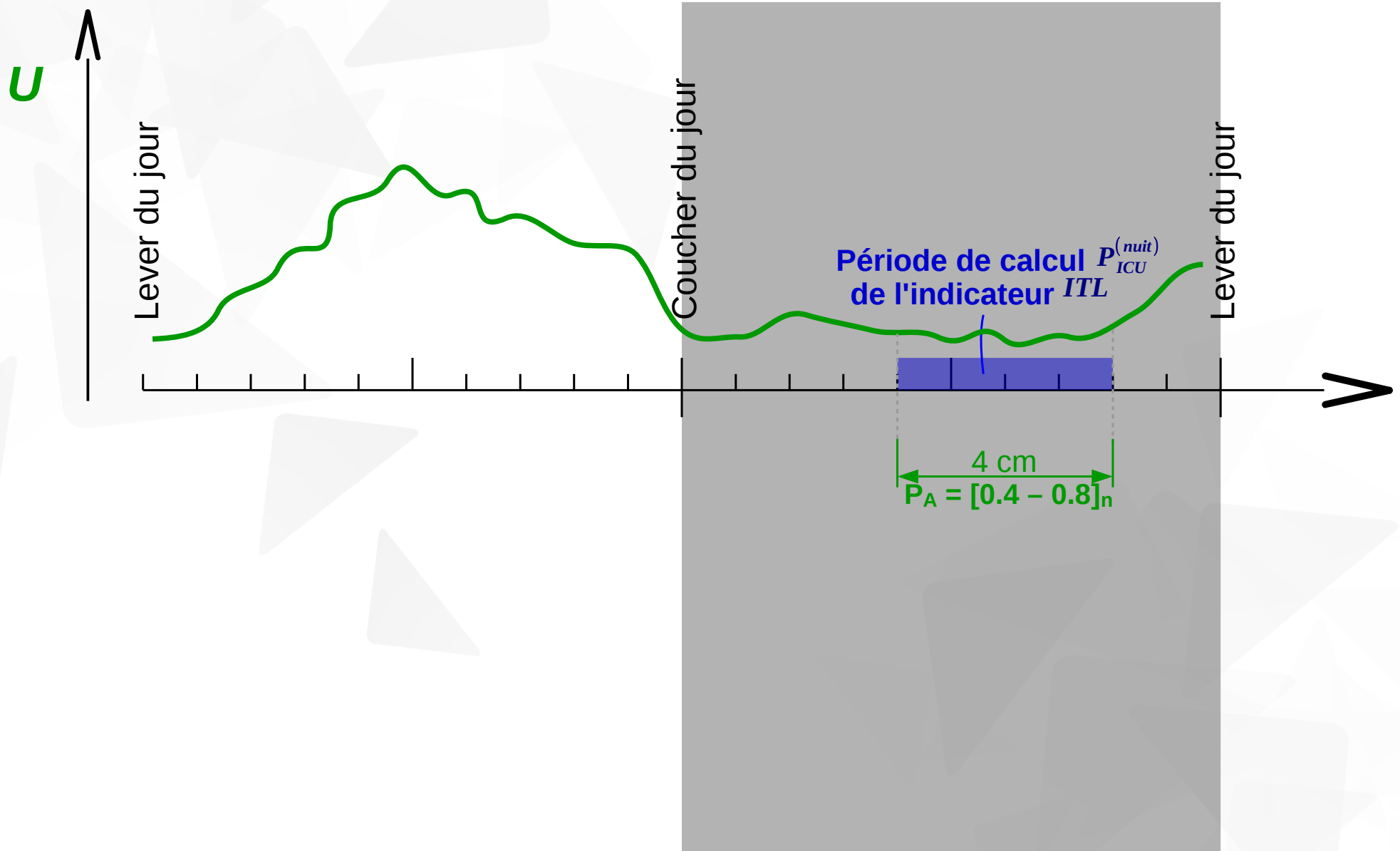
# Méthodologie

## Calcul des indicateurs météorologiques



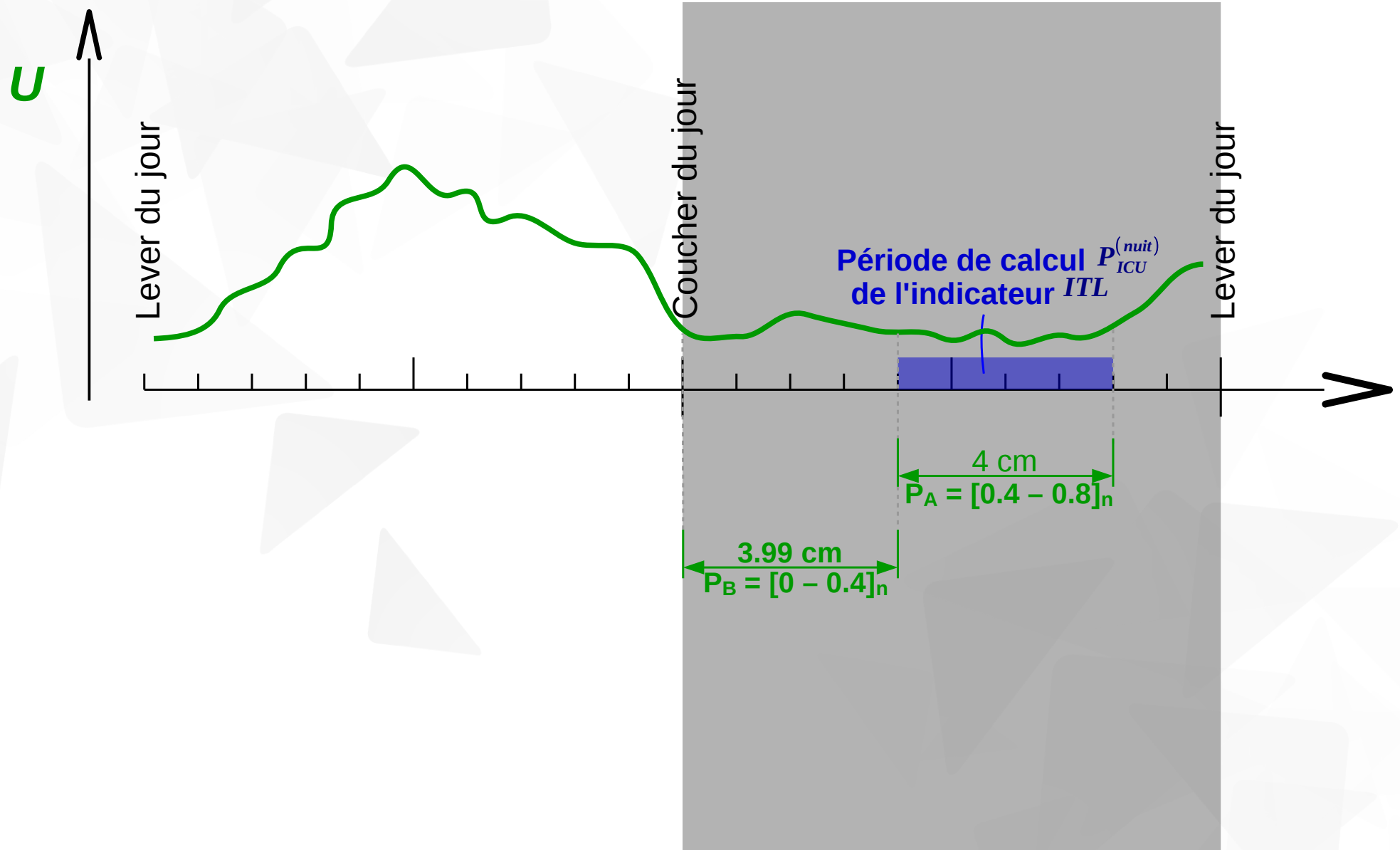
# Méthodologie

## Calcul des indicateurs météorologiques



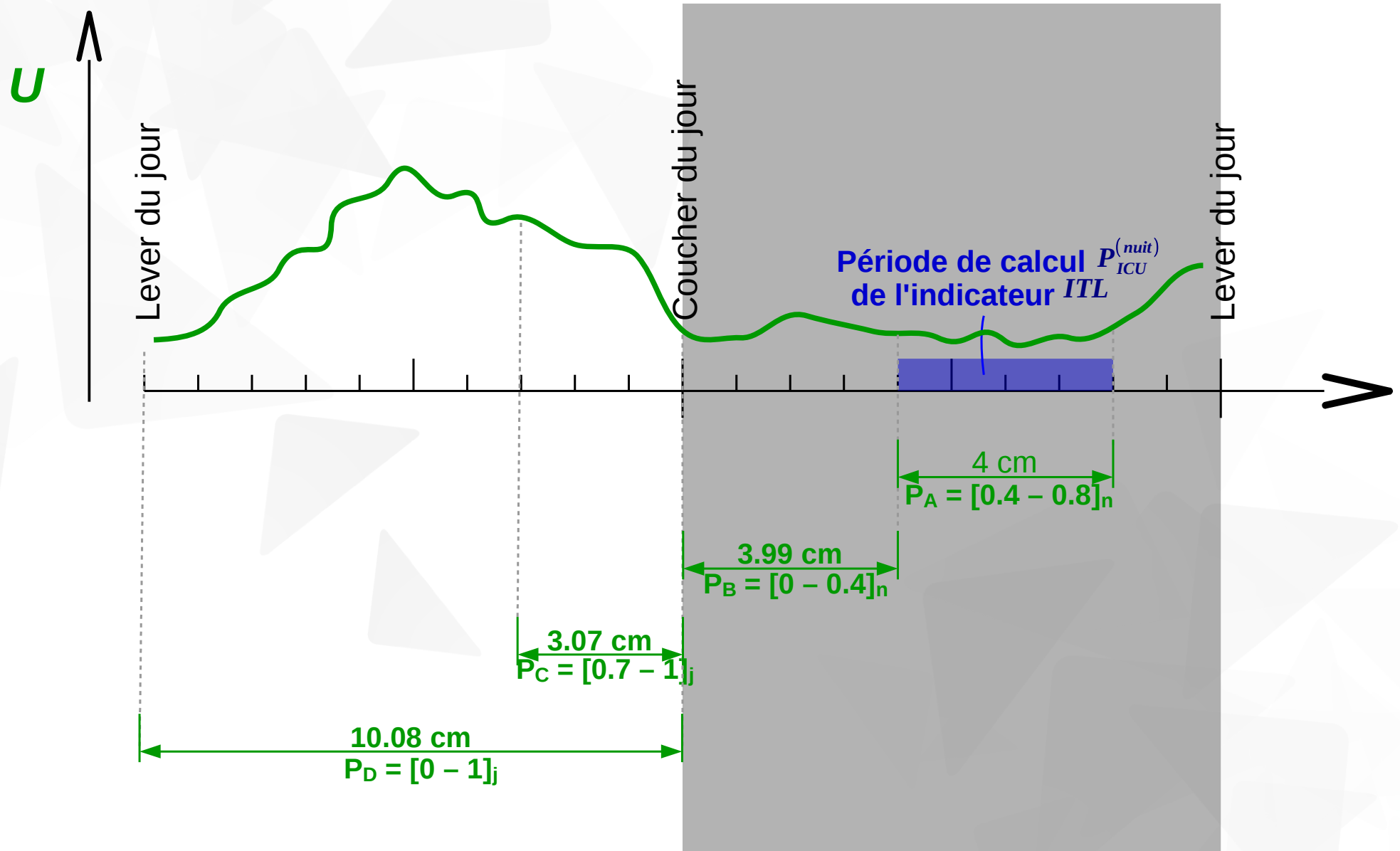
# Méthodologie

## Calcul des indicateurs météorologiques



# Méthodologie

## Calcul des indicateurs météorologiques



## Surfaces contributives à la température mesurée

### LÉGENDE :



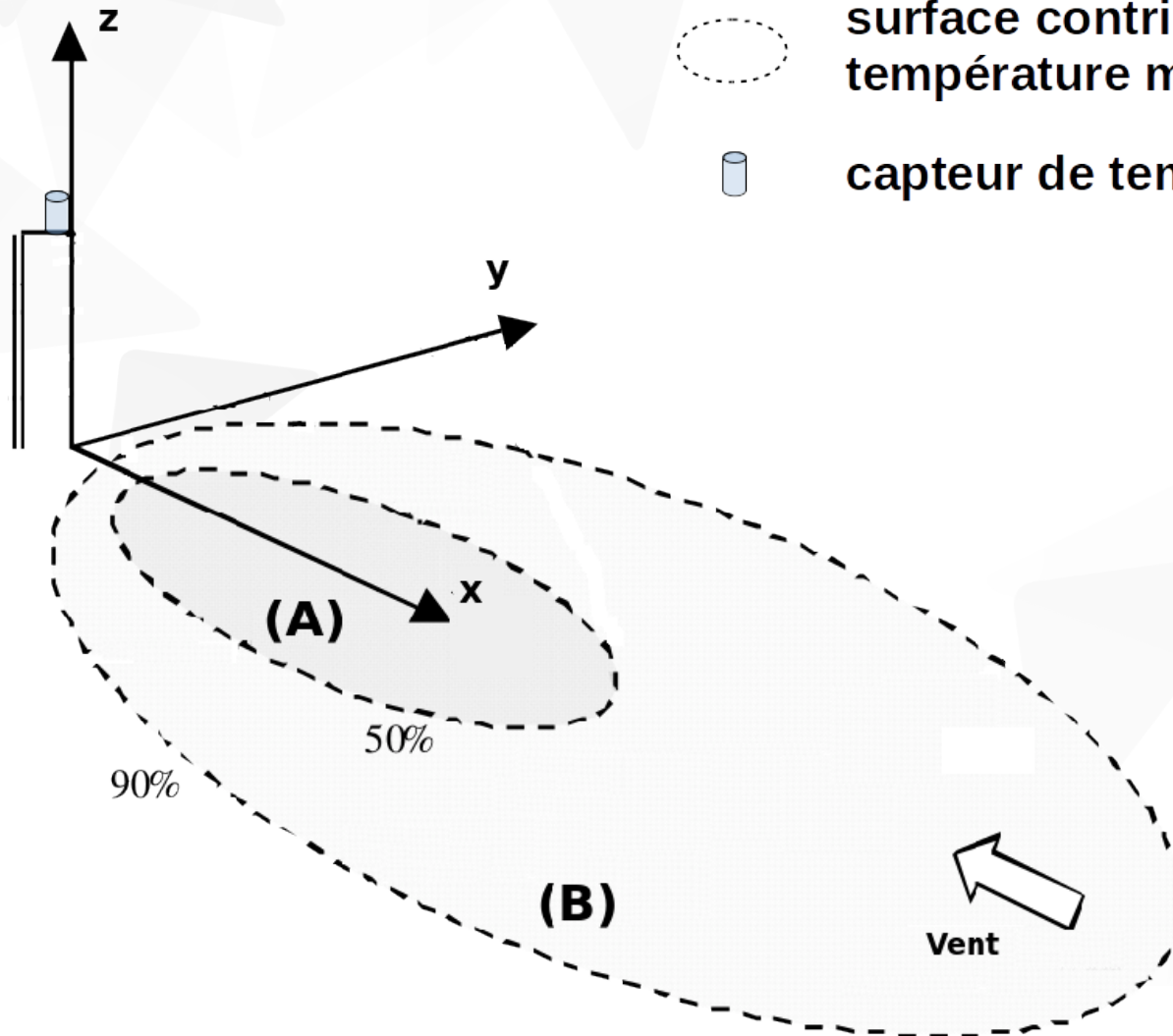
direction du vent



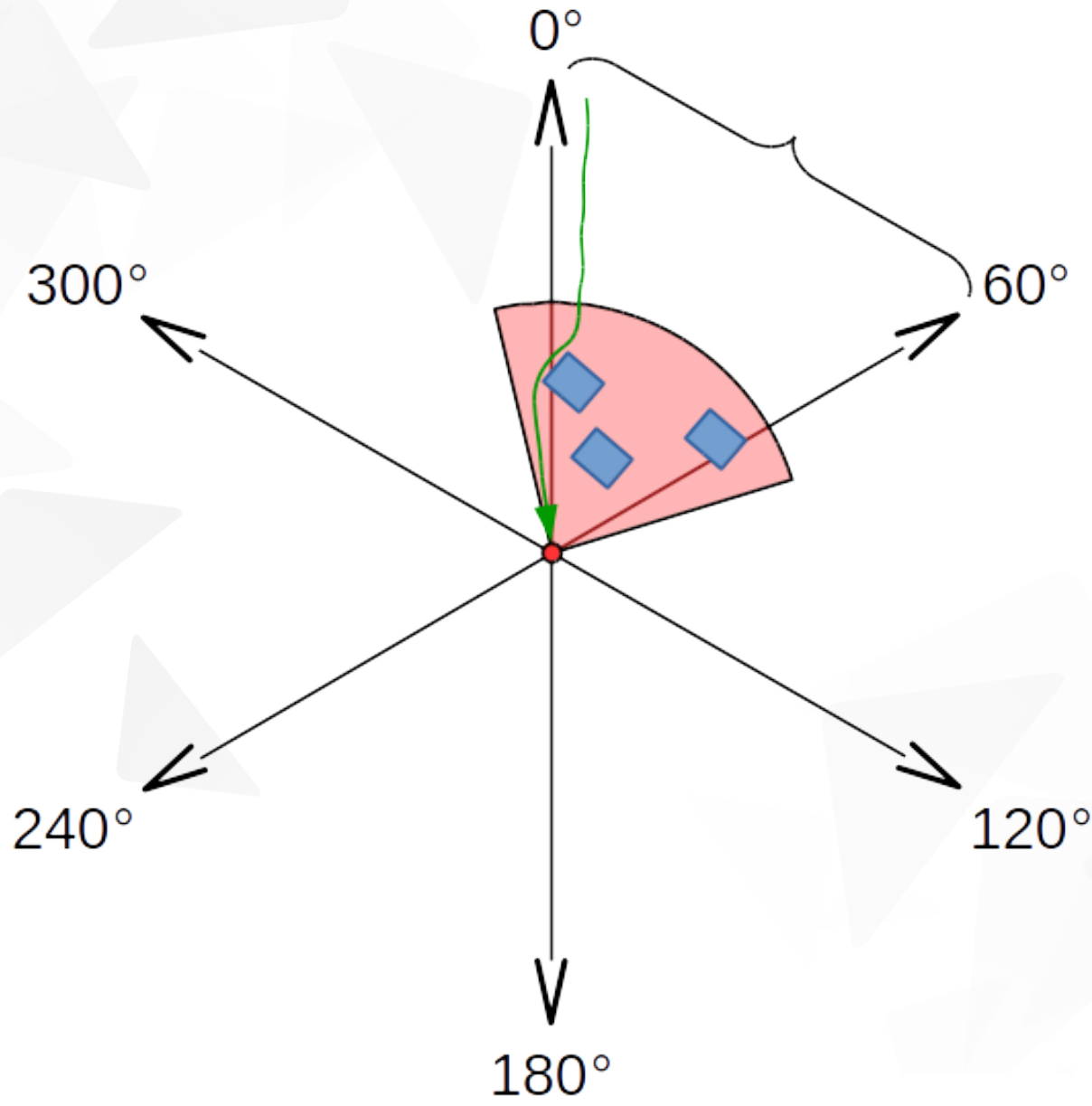
surface contributive à la température mesurée



capteur de température d'air



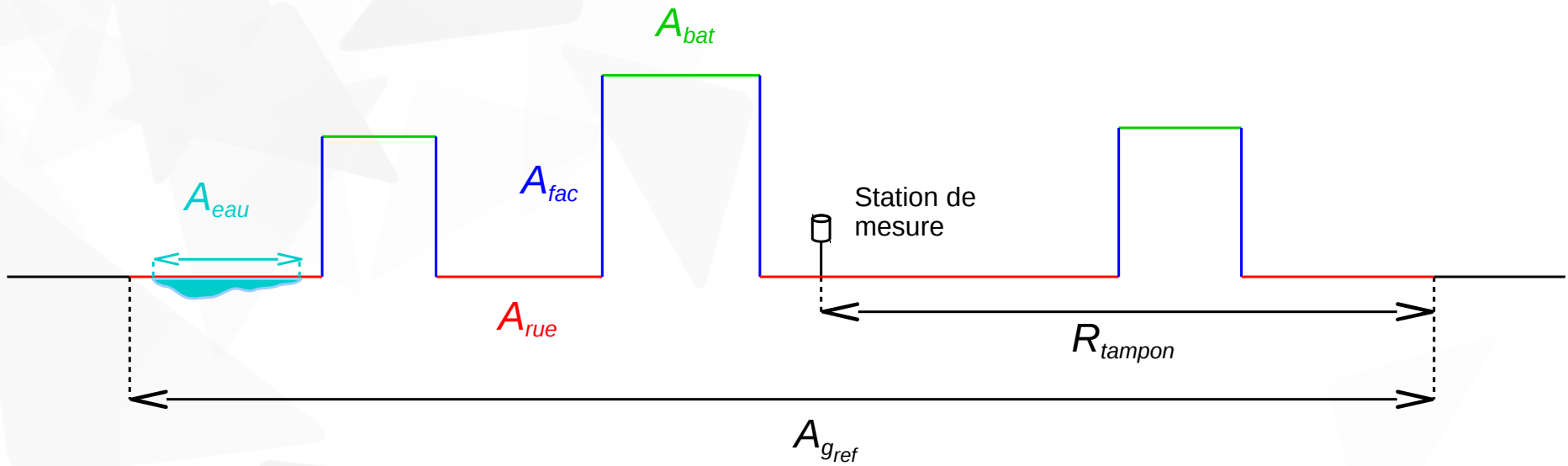
## Surfaces contributives à la température mesurée





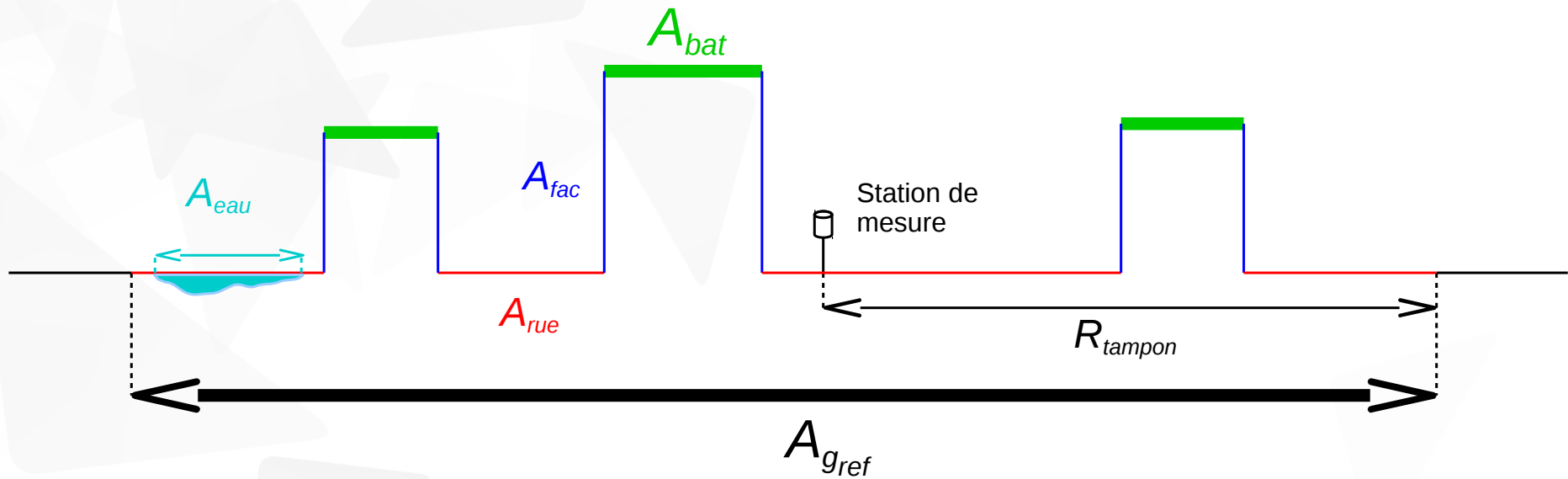
# Méthodologie

## Calcul des indicateurs géographiques



# Méthodologie

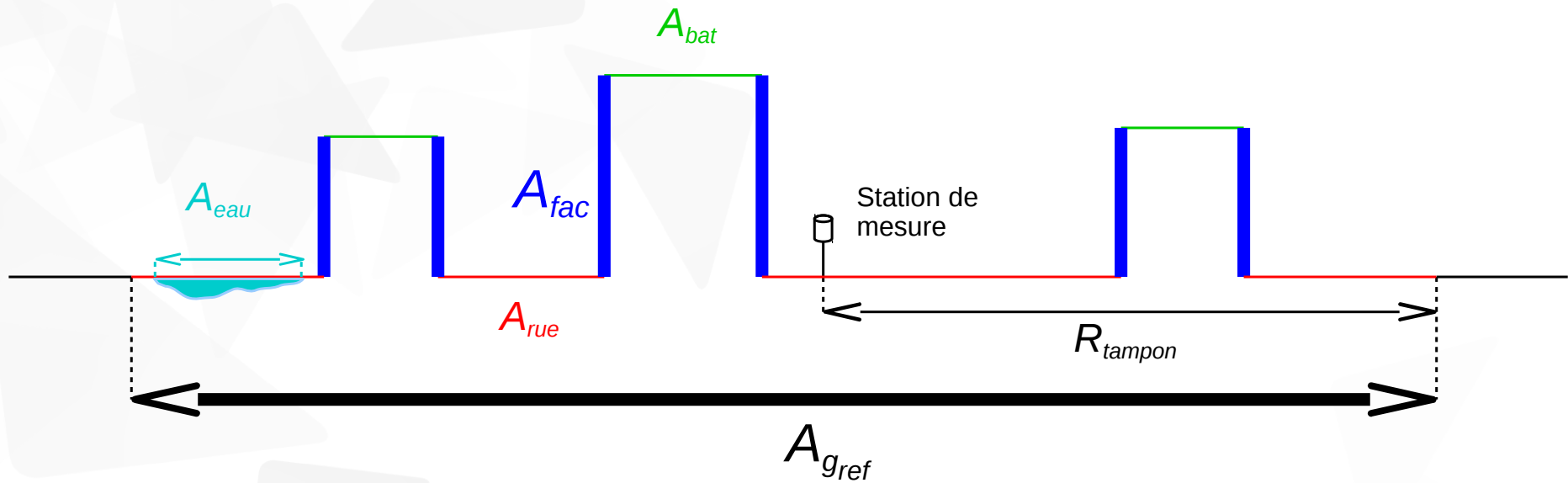
## Calcul des indicateurs géographiques



Sigle	Nom	Formule
$D_{bat}$	Densité de bâtiments	$\frac{A_{bat}}{A_{gref}}$

# Méthodologie

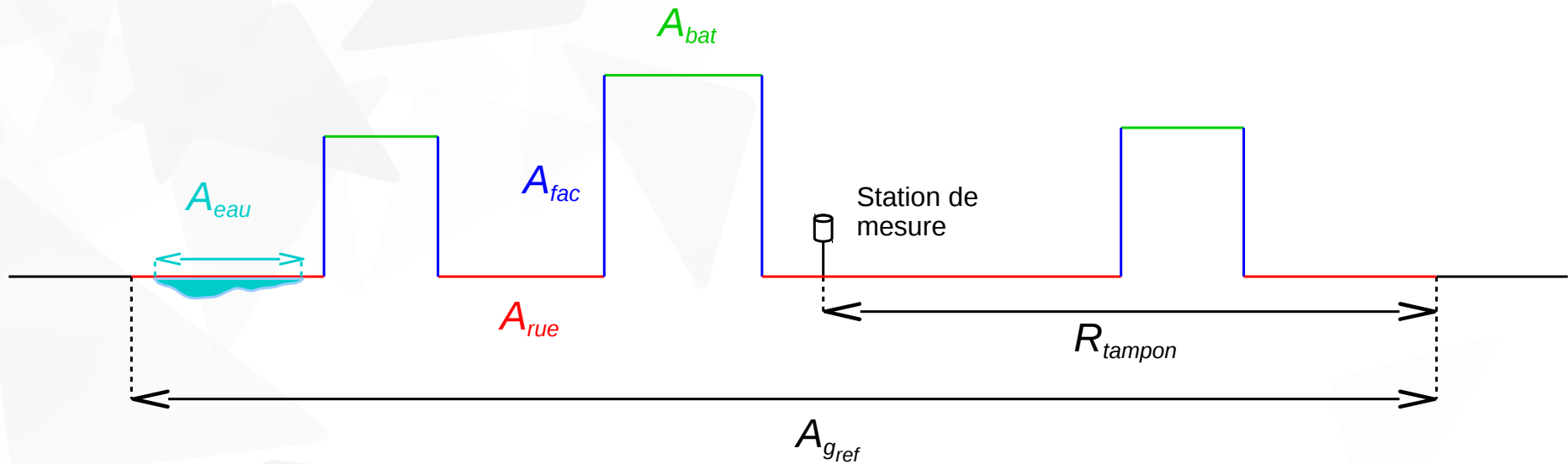
## Calcul des indicateurs géographiques



Sigle	Nom	Formule
$D_{bat}$	Densité de bâtiments	$\frac{A_{bat}}{A_{gref}}$
$D_{fac}$	Densité de façade	$\frac{A_{fac}}{A_{fac} + A_{gref}}$

# Méthodologie

## Calcul des indicateurs géographiques



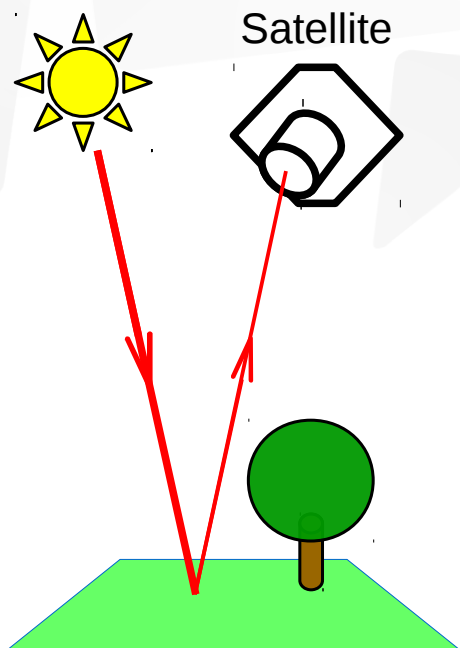
Sigle	Nom	Formule
$D_{bat}$	Densité de bâtiments	$\frac{A_{bat}}{A_{gref}}$
$D_{fac}$	Densité de façade	$\frac{A_{fac}}{A_{fac} + A_{gref}}$
$D_{surf}$	Densité de surface totale	$\frac{A_{fac} + A_{gref}}{A_{fac}}$
$D_{eau}$	Densité de surface en eau	$\frac{A_{eau}}{A_{gref}}$

## Calcul des indicateurs géographiques

Sigle	Nom
<i>NDVI</i>	Indice de végétation par différences normalisées (NDVI)

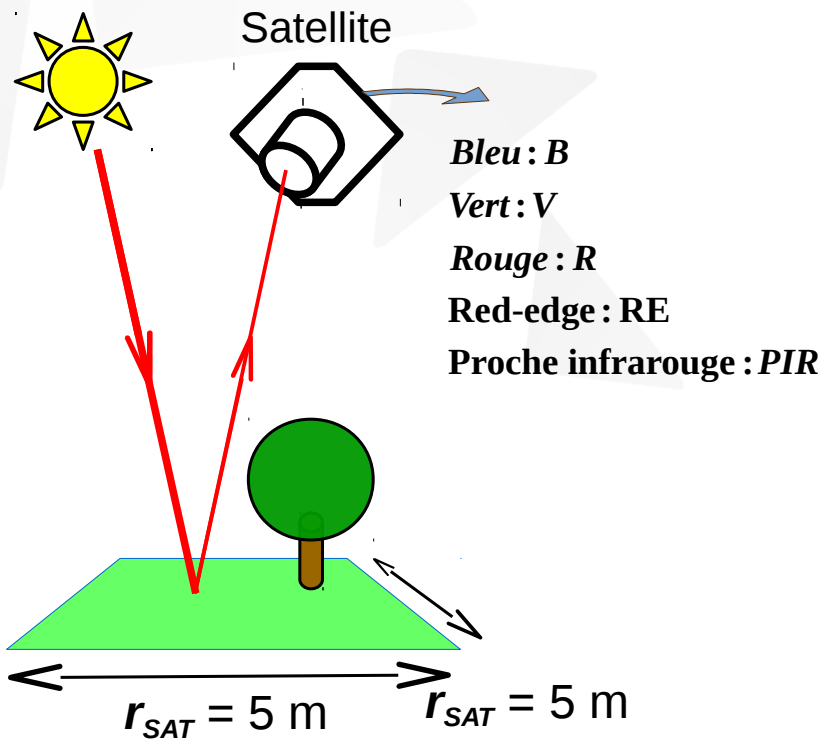
## Calcul des indicateurs géographiques

Sigle	Nom
<i>NDVI</i>	Indice de végétation par différences normalisées (NDVI)



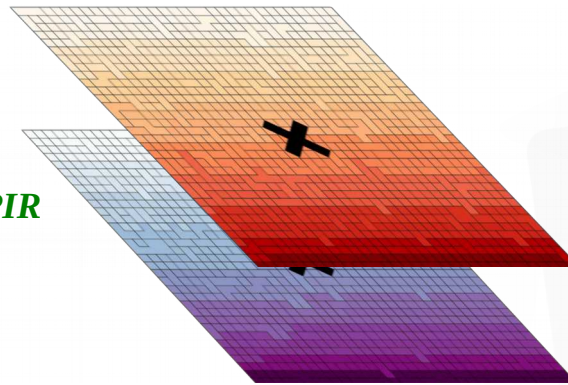
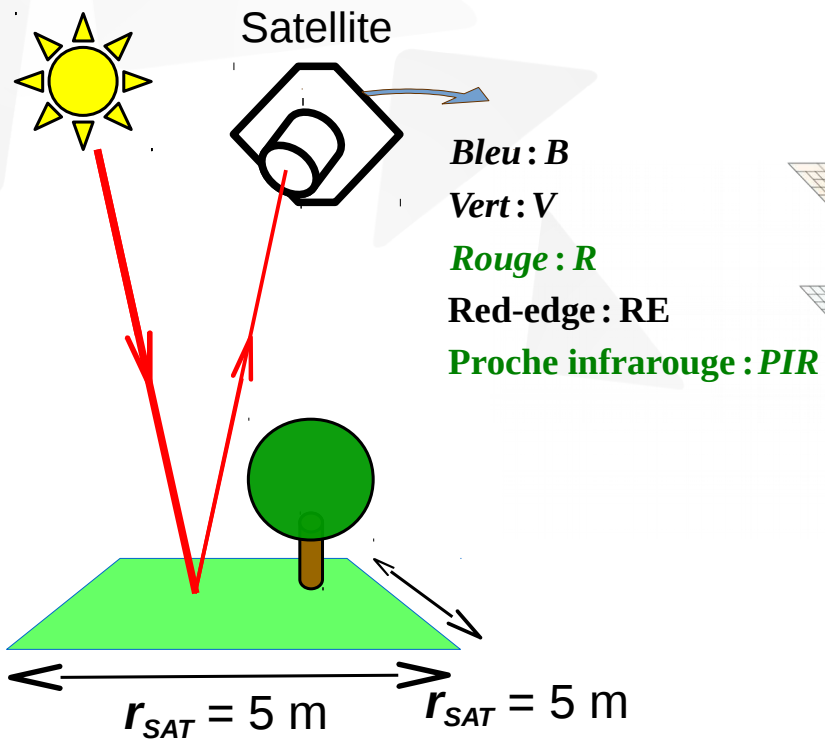
## Calcul des indicateurs géographiques

Sigle	Nom
<i>NDVI</i>	Indice de végétation par différences normalisées (NDVI)



## Calcul des indicateurs géographiques

Sigle	Nom
<i>NDVI</i>	Indice de végétation par différences normalisées (NDVI)

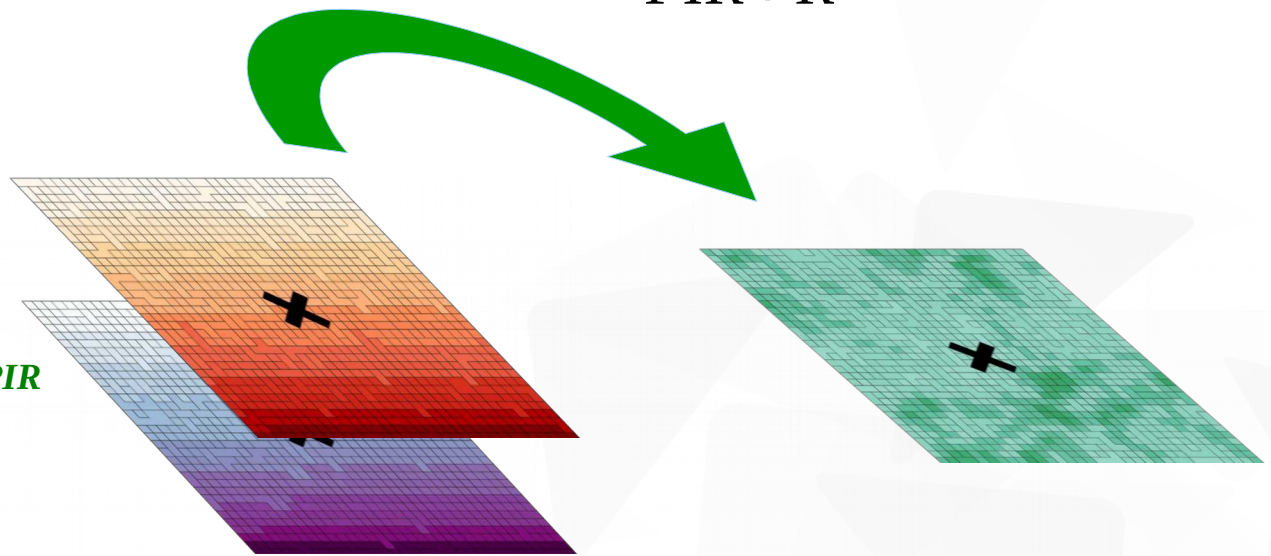
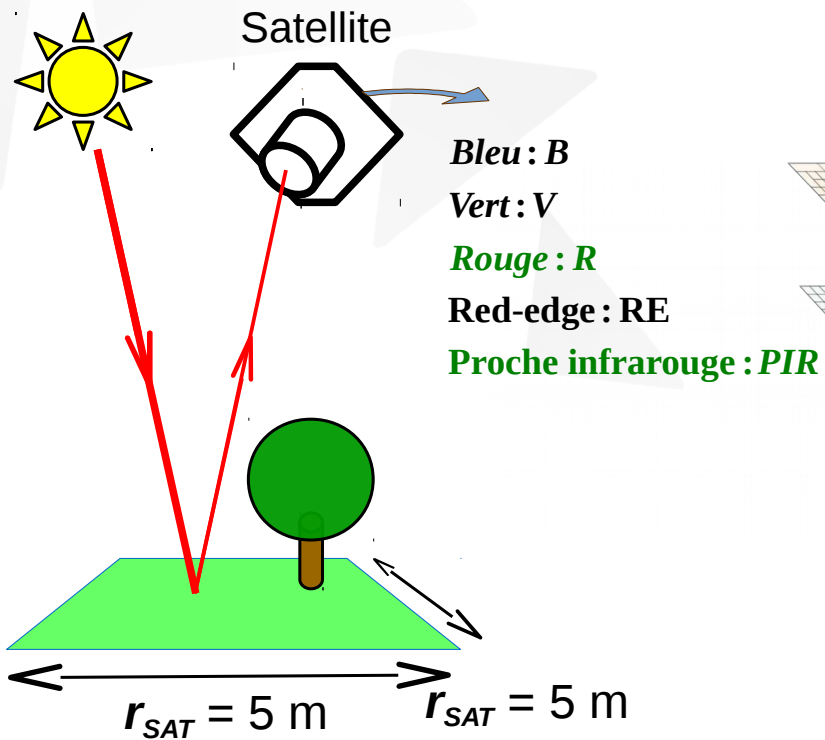




## Calcul des indicateurs géographiques

Sigle	Nom
<i>NDVI</i>	Indice de végétation par différences normalisées (NDVI)

$$NDVI = \frac{PIR - R}{PIR + R}$$

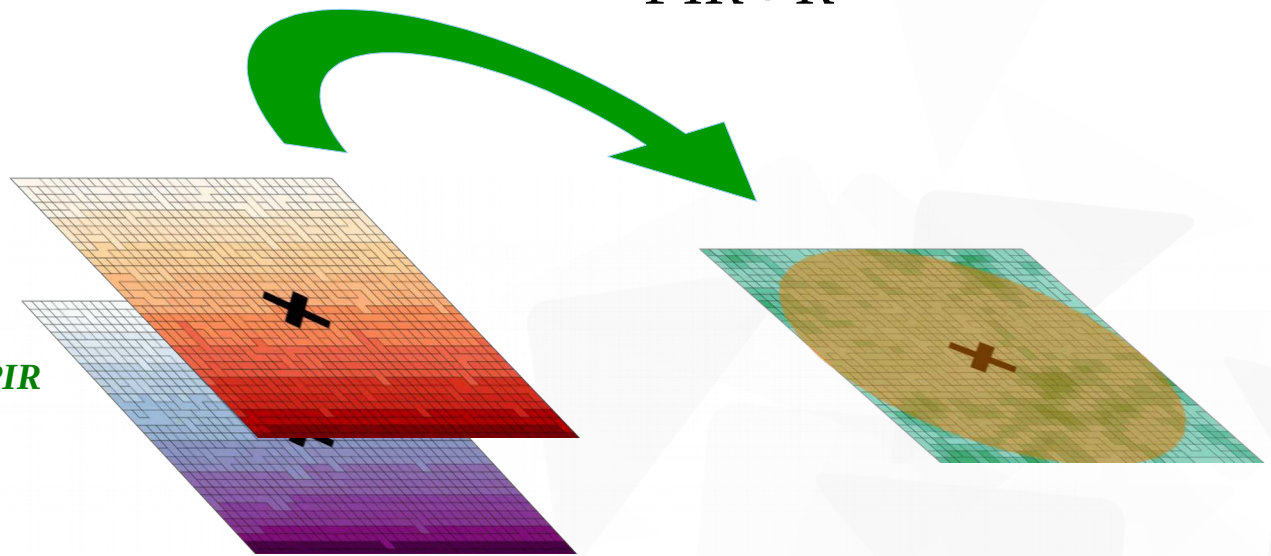
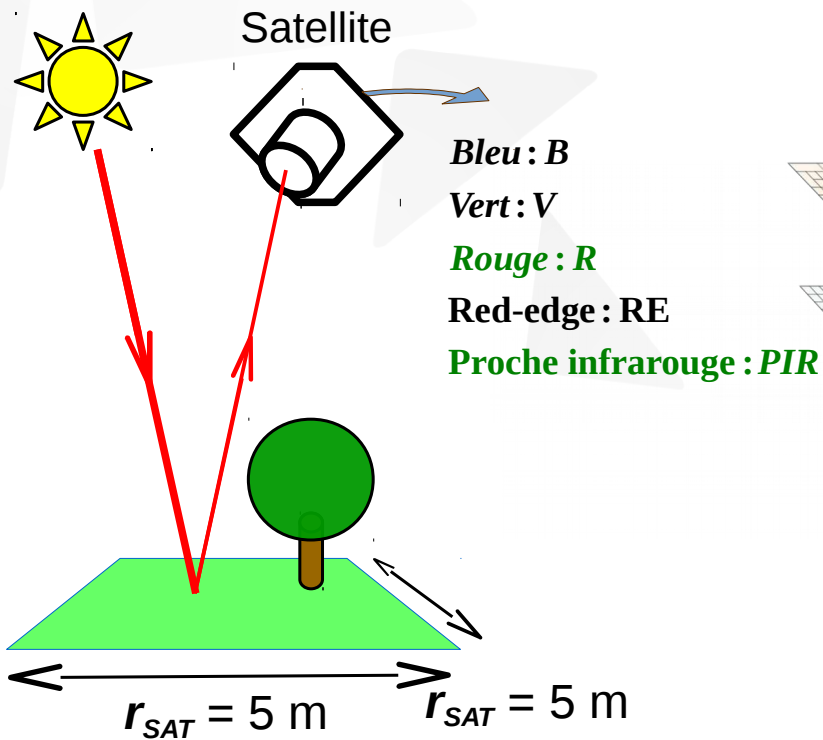


# Méthodologie

## Calcul des indicateurs géographiques

Sigle	Nom
<i>NDVI</i>	Indice de végétation par différences normalisées (NDVI)

$$NDVI = \frac{PIR - R}{PIR + R}$$






## Calcul des indicateurs géographiques

$d_{periph}$

## Calcul des indicateurs géographiques

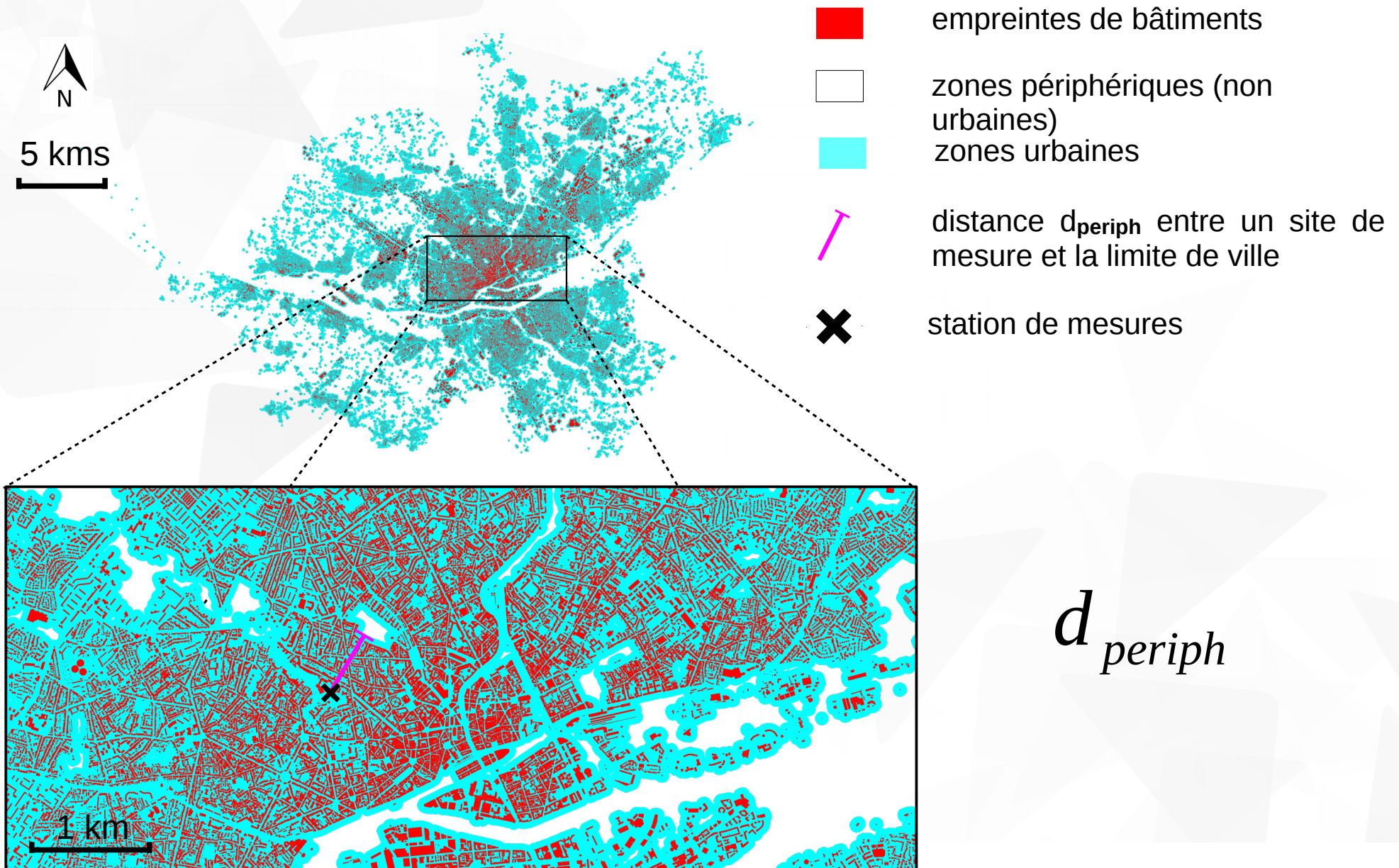


-  empreintes de bâtiments
-  zones périphériques (non urbaines)
-  zones urbaines

$d_{periph}$

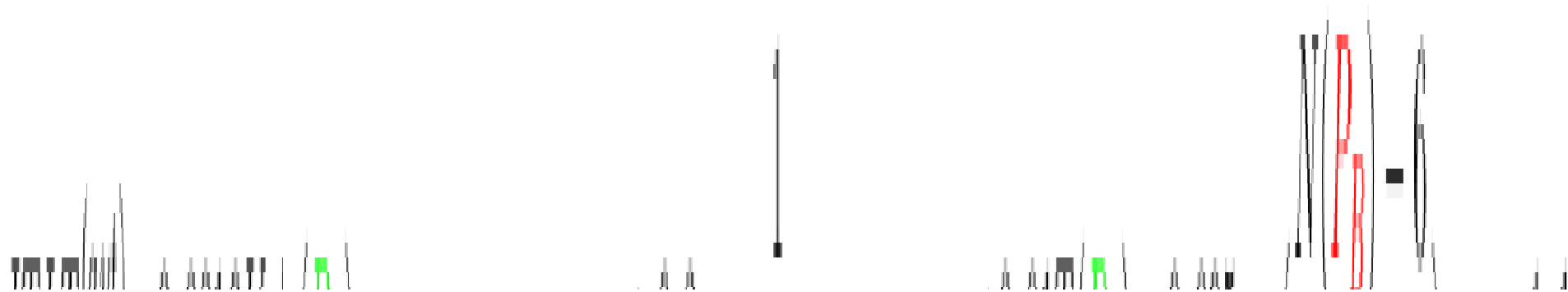


## Calcul des indicateurs géographiques



# Résultats

## Modèles pour l'indicateur diurne



## Modèles pour l'indicateur diurne

$$\begin{aligned}
 ITLT^{(aut)} &= 0,0016K \downarrow (P_C) && + 6,3 \frac{1}{U(P_A) + 3,0} && + 0,01T(P_C) - 0,095 \exp\left(\frac{N(P_B) - 6}{6}\right) && -1,1 \\
 ITLT^{(hiv)} &= && 0,081 \exp(-U(P_B) + 3) && - 0,12N(P_A) && +0,64 \\
 ITLT^{(pri)} &= 0,0011K \downarrow (P_C) && + 11,0 \frac{1}{U(P_A) + 3,0} && + 0,033T(P_D) - 0,12N(P_A) && -2,3 \\
 ITLT^{(ete)} &= && -0,0083RH(P_D) - 0,36U(P_A) && -0,13T(P_A) && +3,2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 ITLS_{std}^{(aut)} &= 3,2x_{D_{fac}} && + 0,06 \ln(d_{periph} + 1) - 0,027x_{NDVI} && -2,9x_{D_{bat}} + 0,38 \\
 ITLS_{std}^{(hiv)} &= -3,0x_{D_{fac}} && + 1,4x_{D_{surf}} && + 0,065 \ln(d_{periph} + 1) && + 0,5 \\
 ITLS_{std}^{(pri)} &= && 1,7x_{D_{surf}} && + 0,12 \ln(d_{periph} + 1) - 0,029x_{NDVI} && -3,4x_{D_{bat}} + 0,41 \\
 ITLS_{std}^{(ete)} &= -6,4x_{D_{fac}} && + 3,0x_{D_{surf}} + 4,8x_{D_{eau}} && + 0,15 \ln(d_{periph} + 1) && + 0,86
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 ITLS_{moy}^{(aut)} &= 5,3x_{D_{fac}} && + 0,15 \ln(d_{periph} + 1) - 0,057x_{NDVI} && -5,5x_{D_{bat}} - 0,39 \\
 ITLS_{moy}^{(hiv)} &= && 2,0x_{D_{surf}} && + 0,12 \ln(d_{periph} + 1) - 0,027x_{NDVI} && -4,0x_{D_{bat}} - 0,2 \\
 ITLS_{moy}^{(pri)} &= && 3,3x_{D_{eau}} && - 0,051x_{NDVI} && + 0,031 \\
 ITLS_{moy}^{(ete)} &= && 12,0x_{D_{eau}} && - 0,045x_{NDVI} && + 0,23
 \end{aligned}$$

# Résultats

## Modèles pour l'indicateur diurne

$ITLT^{(aut)} = 0,0016K \downarrow (P_C)$	$+ 6,3 \frac{1}{U(P_A) + 3,0}$	$+0,01T(P_C) - 0,095 \exp\left(\frac{N(P_B) - 6}{6}\right)$	$-1,1$
$ITLT^{(hiv)} =$	$0,08 \exp(-U(P_B) + 3)$	$- 0,12N(P_A)$	$+0,64$
$ITLT^{(pri)} = 0,0011K \downarrow (P_C)$	$+ 11,0 \frac{1}{U(P_A) + 3,0}$	$+0,033T(P_D) - 0,12N(P_A)$	$-2,3$
$ITLT^{(ete)} =$	$-0,0083RH(P_D) - 0,36U(P_A)$	$-0,13T(P_A)$	$+3,2$

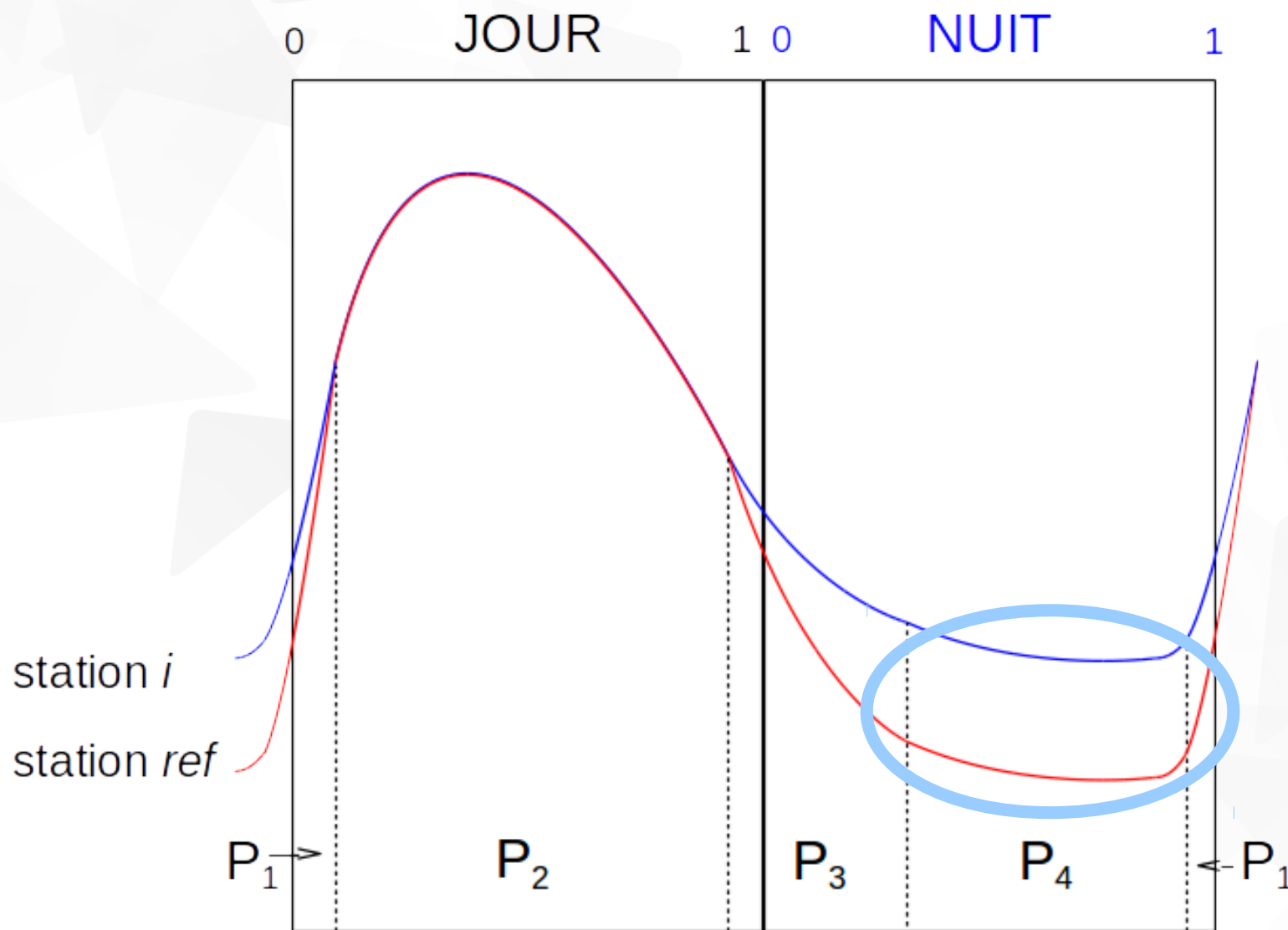


$ITLS_{std}^{(aut)} = 3,2x_{D_{fac}}$	$+1,4x_{D_{surf}}$	$+0,12 \ln(d_{periph} + 1) - 0,027x_{NDVI}$	$-2,9x_{D_{bat}} + 0,38$
$ITLS_{std}^{(hiv)} = -3,0x_{D_{fac}}$	$+1,7x_{D_{surf}}$	$+0,12 \ln(d_{periph} + 1) - 0,029x_{NDVI}$	$+0,5$
$ITLS_{std}^{(pri)} =$	$+3,0x_{D_{surf}} - 4,8x_{D_{eau}}$	$+0,15 \ln(d_{periph} + 1)$	$-3,4x_{D_{bat}} + 0,41$
$ITLS_{std}^{(ete)} = -6,4x_{D_{fac}}$			$+0,86$

$ITLS_{moy}^{(aut)} = 5,3x_{D_{fac}}$		$+0,15 \ln(d_{periph} + 1) - 0,057x_{NDVI}$	$-5,5x_{D_{bat}} - 0,39$
$ITLS_{moy}^{(hiv)} =$	$2,0x_{D_{surf}}$	$+0,12 \ln(d_{periph} + 1) - 0,027x_{NDVI}$	$-4,0x_{D_{bat}} - 0,2$
$ITLS_{moy}^{(pri)} =$	$3,3x_{D_{eau}}$	$-0,051x_{NDVI}$	$+0,031$
$ITLS_{moy}^{(ete)} =$	$12,0x_{D_{eau}}$	$-0,045x_{NDVI}$	$+0,23$



## Rappel de la méthode de reconstitution



# Application

## Données et outils nécessaires

### ✓ Données nécessaires

#### ✓ *Données météorologiques* d'une station de référence

- ✓ *température de l'air;*
- ✓ *nébulosité;*
- ✓ *vitesse et direction du vent;*
- ✓ *rayonnement solaire descendant;*
- ✓ *humidité relative de l'air*

#### ✓ *Données géographiques* pour le site de la station de référence et le quartier à modéliser :

- ✓ *BD Topographique (bâtiments et surfaces d'eau);*
  - *image satellitaire (ayant les bandes rouge et proche infra-rouge)*

# Application

## Données et outils nécessaires

### ✓ Données nécessaires

#### ✓ *Données météorologiques* d'une station de référence

- ✓ *température de l'air;*
- ✓ *nébulosité;*
- ✓ *vitesse et direction du vent;*
- ✓ *rayonnement solaire descendant;*
- ✓ *humidité relative de l'air*

#### ✓ *Données géographiques* pour le site de la station de référence et le quartier à modéliser :

- ✓ *BD Topographique (bâtiments et surfaces d'eau);*
- ✓ *image satellitaire (ayant les bandes rouge et proche infra-rouge)*

### ✓ Outils nécessaires





- ✓ QGIS;
- ✓ OrbisGIS;
- ✓ MorphoLim;
- ✓ Python.

## Analyse des performances de la méthode proposée



500 m

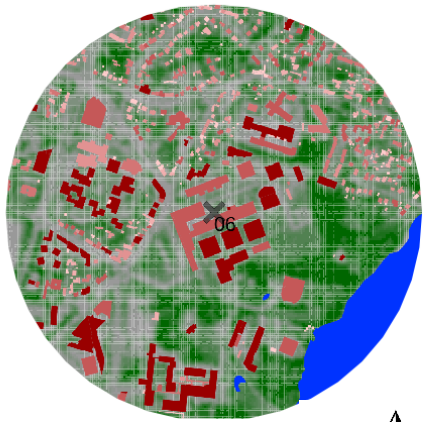


-  sol artificiel → végétation
-  bâtiment bas → bâtiment haut
-  surface d'eau
-  station TRH

# Application





## Analyse des performances de la méthode proposée

### ✓ Solution 1 : station Météo-France



500 m



-  sol artificiel → végétation
-  bâtiment bas → bâtiment haut
-  surface d'eau
-  station TRH

# Application





## Analyse des performances de la méthode proposée

- ✓ Solution 1 : station Météo-France
- ✓ Solution 2 : capteur sous abri (de qualité moyenne) sur site pendant la période d'intérêt



500 m

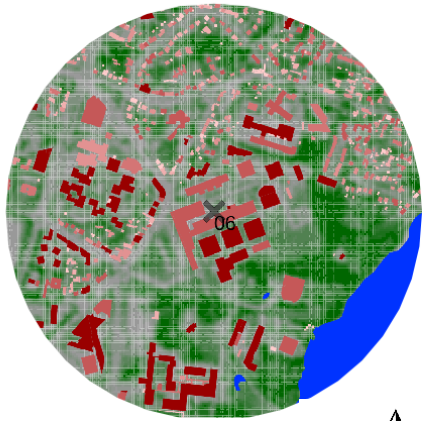


-  sol artificiel → végétation
-  bâtiment bas → bâtiment haut
-  surface d'eau
-  station TRH

# Application





## Analyse des performances de la méthode proposée

- ✓ Solution 1 : station Météo-France
- ✓ Solution 2 : capteur sous abri (de qualité moyenne) sur site pendant la période d'intérêt
- ✓ Solution 3 : reconstitution à partir des résultats de la thèse



500 m



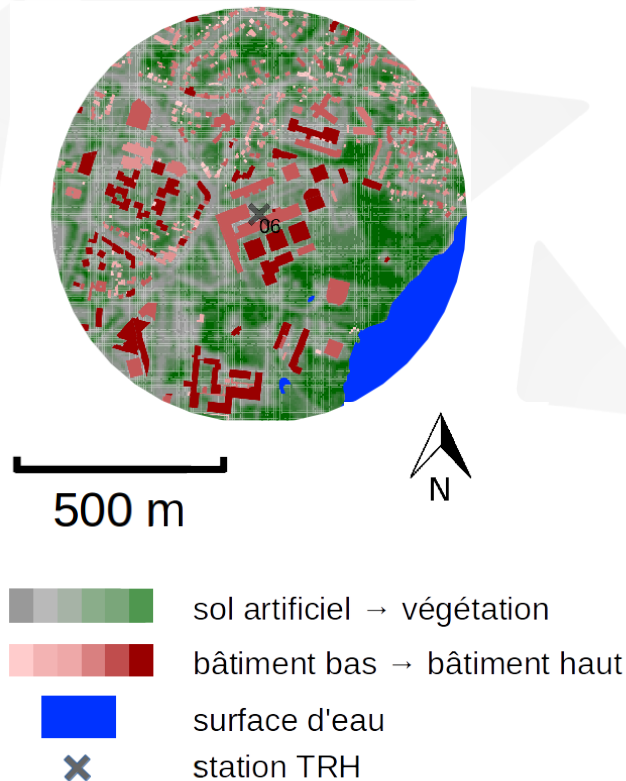
-  sol artificiel → végétation
-  bâtiment bas → bâtiment haut
-  surface d'eau
-  station TRH

# Application

## Analyse des performances de la méthode proposée

- ✓ Solution 1 : station Météo-France
- ✓ Solution 2 : capteur sous abri (de qualité moyenne) sur site pendant la période d'intérêt
- ✓ Solution 3 : reconstitution à partir des résultats de la thèse

*Référence pour comparer les performances des solutions : capteur sous abri (de bonne qualité) sur site pendant la période d'intérêt*



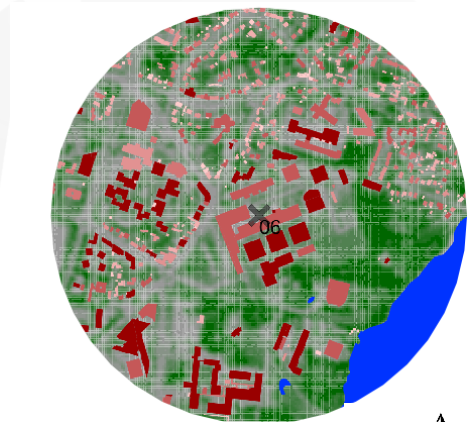


# Application

## Analyse des performances de la méthode proposée

- ✓ Solution 1 : station Météo-France
- ✓ Solution 2 : capteur sous abri (de qualité moyenne) sur site pendant la période d'intérêt
- ✓ Solution 3 : reconstitution à partir des résultats de la thèse

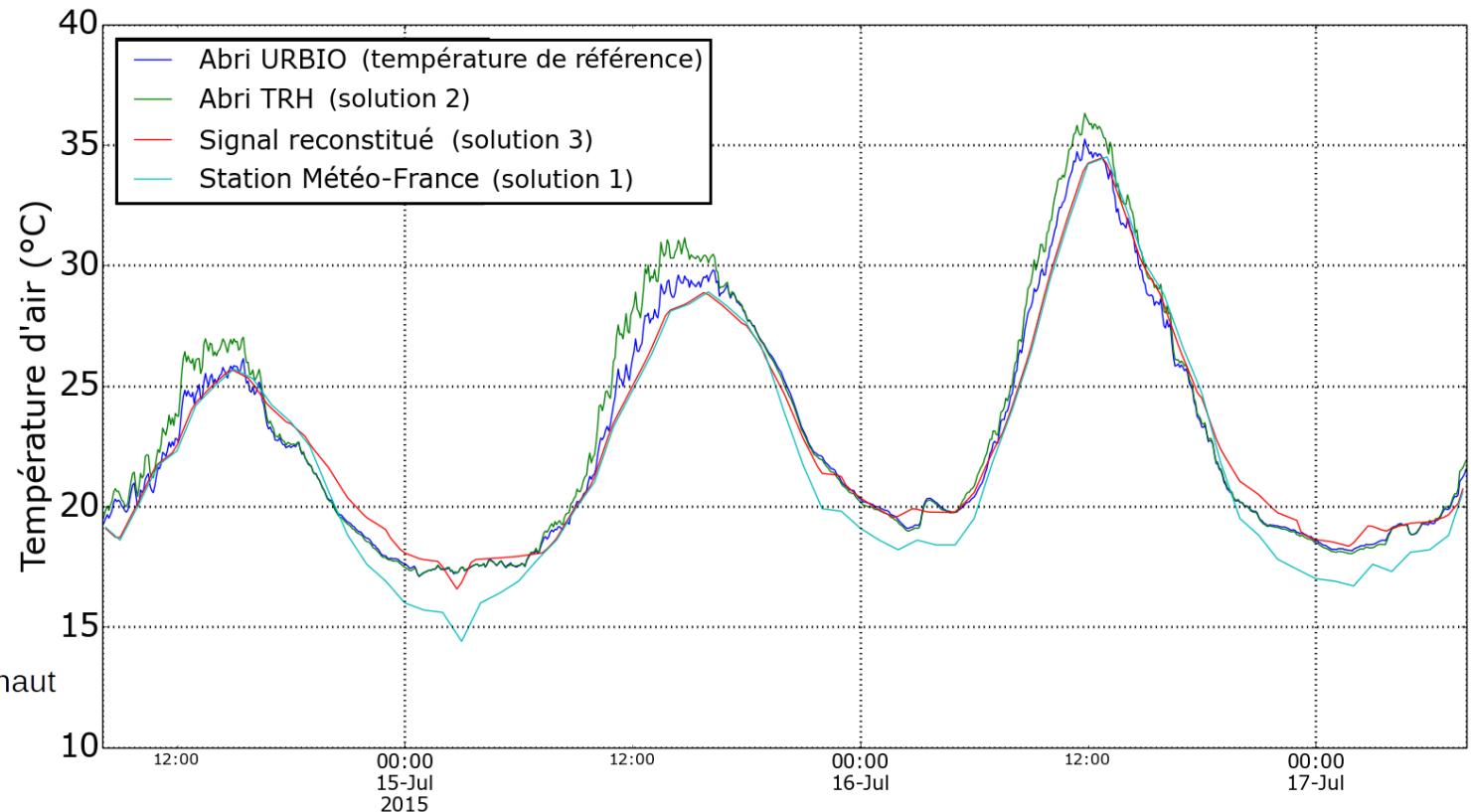
*Référence pour comparer les performances des solutions : capteur sous abri (de bonne qualité) sur site pendant la période d'intérêt*



500 m



- sol artificiel → végétation
- bâtiment bas → bâtiment haut
- surface d'eau
- station TRH



Merci de votre attention ! Des questions ?

