

Quantification du gain de fraîcheur obtenu sous une chênaie quand il fait tant chaud l'été

P^r Jean R. LOBRY

Pour essayer d'objectiver le gain de fraîcheur obtenu en allant musarder en forêt, on compare dans cette fiche les données de température et d'humidité relative de deux stations météo voisines, l'une étant dans une chênaie et l'autre en rase plaine.

Table des matières

1	Introduction	2
2	Origine des données	2
2.1	Les données en plaine ouverte	2
2.2	Les données en forêt fermée	4
2.3	Cohérence des données	4
3	Les températures maximales journalières	5
3.1	Calcul	5
3.2	Comparaison	6
4	Les humidités relatives	6
4.1	Calcul	6
4.2	Comparaison	6
5	Les températures ressenties (<i>humidex</i>)	7
5.1	Calcul	7
5.2	Comparaison	8
	Références	12

1 Introduction

QUI ira se promener en forêt pas temps caniculaire ne manquera pas d'apprécier la relative fraîcheur qui y règne. Il y a bien entendu l'effet protecteur de l'ombre projetée par les houppiers, mais pas seulement : un chêne adulte peut transpirer jusqu'à 400 litres d'eau par jour [1], ce qui refroidit localement la température ambiante mesurée sous abri.

2 Origine des données

LES données météorologiques (relevés horaires de la température et de l'humidité relative) de deux stations voisines (figure 1 page 3), mais dont l'une est en plaine ouverte et l'autre en forêt fermée, ont été exploitées ici. Elles courent du début de l'année 2024 jusqu'à la mi-août.

2.1 Les données en plaine ouverte

ON part des données météo horaires distribuées par Météo-France¹ pour le département de la CÔTE-D'OR. Nous commençons par censurer les colonnes non documentées :

```
H21 <- read.table("Fraicheur/H_21_latest-2023-2024.csv", header = TRUE, sep = ";")
pasdoc <- apply(H21, 2, \ (x) all(is.na(x)))
H21 <- H21[ , !pasdoc]
save(H21, file = "Fraicheur/H21.Rda")
```

SUR les 25 stations disponibles, nous sélectionnons celle de PAGNY-LE-CHÂTEAU qui est la plus proche du site LBBE et pour laquelle les données sur l'humidité relative sont renseignées (figure 1 page 3). Les temps sont en UTC, on ne conserve que les données de l'année 2024.

```
load("Fraicheur/H21.Rda")
PLC <- subset(H21, NUM_POSTE == 21131001)
PLC <- PLC[ , c(1:6, 32, 60)]
PLC$valid <- as.POSIXct(as.character(PLC$AAAAMMJHH), "Etc/GMT", "%Y%m%d%H")
PLC <- subset(PLC, year(valid) == 2024)
PLC <- PLC[ , -6]
save(PLC, file = "Fraicheur/PLC.Rda")
```

```
load("Fraicheur/PLC.Rda")
head(PLC)
```

	NUM_POSTE	NOM_USUEL	LAT	LON	ALTI	T	U	valid
53041	21131001	PAGNY-LE-CHATEAU	47.04317	5.190667	182	6.7	78	2024-01-01 00:00:00
53042	21131001	PAGNY-LE-CHATEAU	47.04317	5.190667	182	6.9	78	2024-01-01 01:00:00
53043	21131001	PAGNY-LE-CHATEAU	47.04317	5.190667	182	6.8	78	2024-01-01 02:00:00
53044	21131001	PAGNY-LE-CHATEAU	47.04317	5.190667	182	6.1	79	2024-01-01 03:00:00
53045	21131001	PAGNY-LE-CHATEAU	47.04317	5.190667	182	5.9	81	2024-01-01 04:00:00
53046	21131001	PAGNY-LE-CHATEAU	47.04317	5.190667	182	5.1	83	2024-01-01 05:00:00

NOTONS que la station météo est à 182 m d'altitude, ce qui est très proche des 220 m d'altitude du site LBBE. Si on compte classiquement une perte de 6 K par km, cela fait un écart de 0.228 K que l'on va négliger ici.

¹Fichier H_21_latest-2023-2024.csv à <https://meteo.data.gouv.fr/datasets/donnees-climatologiques-de-base-horaires/>

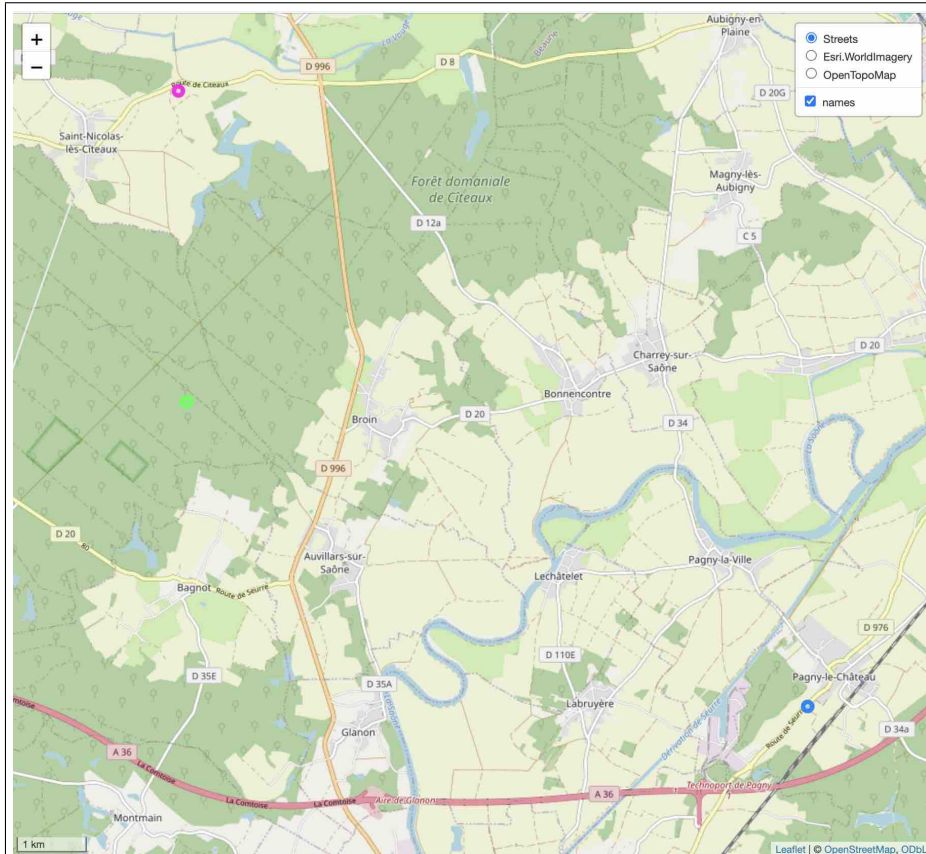


FIGURE 1 : Plan de situation des stations météo. Nous sommes dans le département de la CÔTE-D'OR à 30 km au sud de DIJON. Le point rose en haut à gauche est la station météo de SAINT-NICOLAS-LÈS-CÎTEAUX (clef d'identification 21564001 dans les fichiers de Météo-France) mais qui ne renseigne pas les données sur l'humidité relative en 2024. À 4.4 km à vol d'oiseau au sud de ce dernier, le point vert clair est la station météo du LBBE (capteur HOBO n° 20898316). Elle est située dans le site RENECOFOR [3] CHS21, une chênaie de chênes sessiles (*Quercus petraea*) dans la forêt domaniale de CÎTEAU. Le point bleu en bas à droite, à 9.9 km du site CHS21, est la station météo de PAGNY-LE-CHÂTEAU (clef 21131001) pour laquelle les données horaires sur l'humidité relative sont disponibles. La même représentation avec des photos aériennes (figure 2 page 10) met en évidence le contraste entre la station météo du LBBE en pleine forêt fermée et celle de PAGNY-LE-CHÂTEAU en pleine plaine ouverte. La même représentation avec des données topographiques (figure 3 page 11) montre que le relief est très doux, ce qui nous permet de négliger les corrections de température liées au gradient altitudinal.

2.2 Les données en forêt fermée

CE sont les données horaires de température et d'humidité relative du site LBBE (figure 1 page 3). Les temps sont donnés dans l'heure d'hiver en FRANCE métropolitaine, on passe en UTC.

```
hobo <- read.table("Fraicheur/CHS21_2024_08_17.csv", header = TRUE,
  skip = 1, sep = ",", row.names = 1)
colnames(hobo) <- c("Date_string", "T_lbbe", "U_lbbe")
# Les heures sont en UTC+1 (heure d'hiver)
library(lubridate)
hobo$hdi <- parse_date_time(hobo$Date_string,
  "%m/%d/%y %I:%M:%S %p",
  tz = "Etc/GMT-1")
hobo$valid <- with_tz(hobo$hdi, "Etc/GMT")
hobo <- hobo[, c("valid", "T_lbbe", "U_lbbe")]
save(hobo, file = "Fraicheur/hobo.Rda")

load("Fraicheur/hobo.Rda")
range(hobo$valid) # 8 décembre 2023 9h au 17 août 2024 17h UTC
[1] "2023-12-08 09:00:00 GMT" "2024-08-17 17:00:00 GMT"

head(hobo)
      valid T_lbbe U_lbbe
1 2023-12-08 09:00:00 6.797 95.116
2 2023-12-08 10:00:00 7.140 95.165
3 2023-12-08 11:00:00 7.655 95.214
4 2023-12-08 12:00:00 8.256 95.238
5 2023-12-08 13:00:00 8.427 95.189
6 2023-12-08 14:00:00 8.770 95.189
```

2.3 Cohérence des données

ON fait la jointure naturelle entre les deux tables en prenant comme clef d'identification la colonne `valid`, c'est à dire la date et l'heure en UTC.

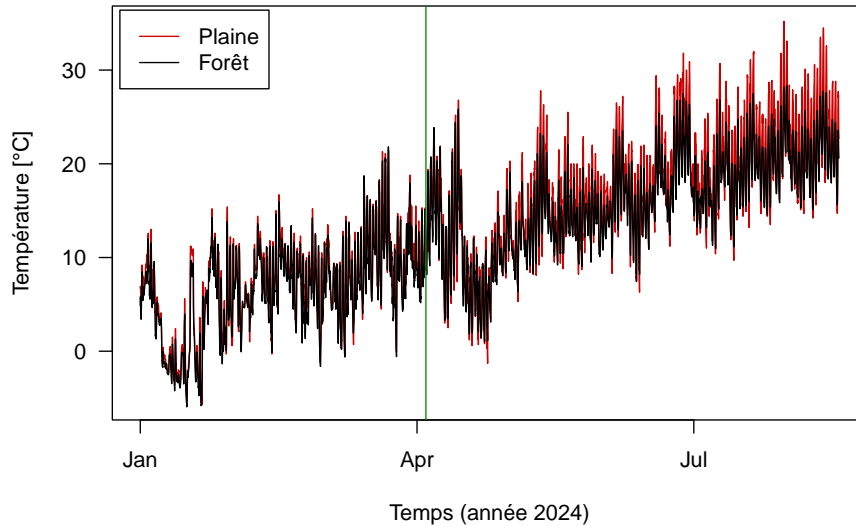
```
load("Fraicheur/hobo.Rda")
load("Fraicheur/PLC.Rda")
cmph <- merge(hobo, PLC[, c("valid", "T", "U")], by.x = "valid", by.y = "valid")
range(cmph$valid)
[1] "2024-01-01 00:00:00 GMT" "2024-08-17 17:00:00 GMT"

head(cmph)
      valid T_lbbe U_lbbe  T  U
1 2024-01-01 00:00:00 4.866 89.646 6.7 78
2 2024-01-01 01:00:00 5.810 87.595 6.9 78
3 2024-01-01 02:00:00 5.253 85.812 6.8 78
4 2024-01-01 03:00:00 4.309 88.791 6.1 79
5 2024-01-01 04:00:00 5.038 86.789 5.9 81
6 2024-01-01 05:00:00 4.566 87.619 5.1 83
```

LA comparaison directe des deux séries montre qu'elles sont cohérentes. Les chênes sessiles ont des feuilles caduques, elles tombent donc en hiver. Pour ce site (voir les figures 3 et 4 de [3]) la saison de végétation commence en moyenne le 4 avril et dure en moyenne 191 jours. On note que les deux séries commencent à diverger après la date de débourrement (ligne verticale verte) avec alors une plus grande amplitude thermique journalière en plaine qu'en forêt.

```
plot(cmph$valid, cmph$T, col = "red3", type = "l", las = 1,
  ylab = "Température [°C]", xlab = "Temps (année 2024)",
  main = "Comparaison des températures horaires")
lines(cmph$valid, cmph$T_lbbe)
abline(v = as.POSIXct("2024-04-04"), col = "green4")
legend("topleft", inset = 0.01, legend = c("Plaine", "Forêt"), lty = 1,
  col = c("red3", "black"))
```

Comparaison des températures horaires



DANS la suite on ne considérera que la saison de végétation en ne conservant que les données après le 1^{er} mai. À partir de cette date on voit bien dans le graphique ci-dessus l'effet tampon de la forêt sur les température : ce sont surtout les températures maximales diurnes qui sont plus faibles, mais on note également que les températures minimales nocturnes sont légèrement plus élevées.

3 Les températures maximales journalières

3.1 Calcul

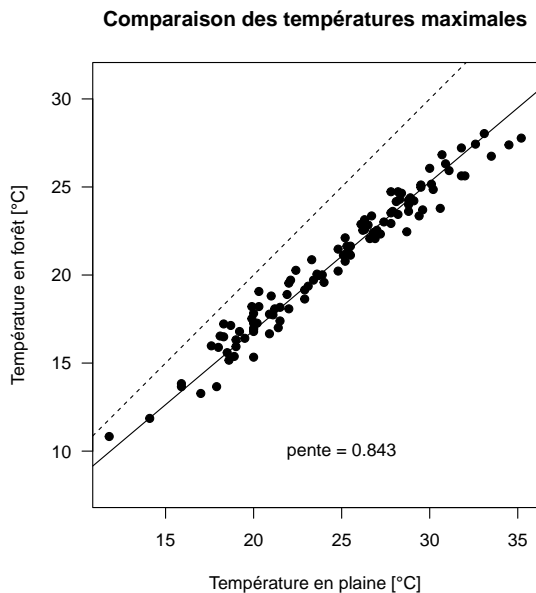
POUR la température maximale journalière, on va se référer à la température en plaine. Nous calculons l'indicateur `flagTmax` qui pointe vers cette valeur. La température maximale du jour j est calculée ici entre 7 h du matin UTC du jour j et 6 h du matin du lendemain

```
myts <- seq(as.POSIXct("2024-01-01 07:00:00", "Etc/GMT"),
           as.POSIXct("2024-08-16 07:00:00", "Etc/GMT"), by = "day")
nd <- length(myts)
cmph$flagTmax <- FALSE
cmph$dayTmax <- as.Date(NA)
for(i in seq_len(nd)){
  the_time <- myts[i]
  the_day <- as.Date(the_time)
  ii <- which(cmph$valid == the_time)
  cmph[ii:(ii + 23), "dayTmax"] <- the_day
  imax <- which.max(cmph[ii:(ii + 23), "T"])
  cmph[ii + imax - 1, "flagTmax"] <- TRUE
}
library(lubridate)
with(subset(cmph, flagTmax & valid > as.POSIXct("2024-05-01")), table(hour(valid)))
9 10 11 12 13 14 15 16 17 19
1 2 8 4 10 18 33 24 7 1
```

L'HEURE la plus chaude est se situe en général entre 14 h et 16 h UTC, soit entre 16 h et 18 h en heure d'été.

3.2 Comparaison

```
with(subset(cmph, flagTmax & valid > as.POSIXct("2024-05-01")), {
  par(pty = "s")
  plot(T, T_lbbe, asp = 1, pch = 19, las = 1,
       xlab = "Température en plaine [°C]",
       ylab = "Température en forêt [°C]",
       main = "Comparaison des températures maximales")
  abline(c(0, 1), lty = 2)
  abline(lm0 <- lm(T_lbbe~T-1))
  text(25, 10, paste("pente =", signif(coef(lm0)[1], 3)))
})
```



Tous les points sont en dessous de la première bissectrice (droite en pointillés), les températures maximales journalières sont systématiquement plus basses en forêt. La pente de la droite de régression par l'origine est de 0.842, ce qui signifie que l'on gagne environ 0.158 degré par degré, par exemple à 35 °C on gagne 5.53 degrés et on repasse donc sous la barre des 30 °C en forêt.

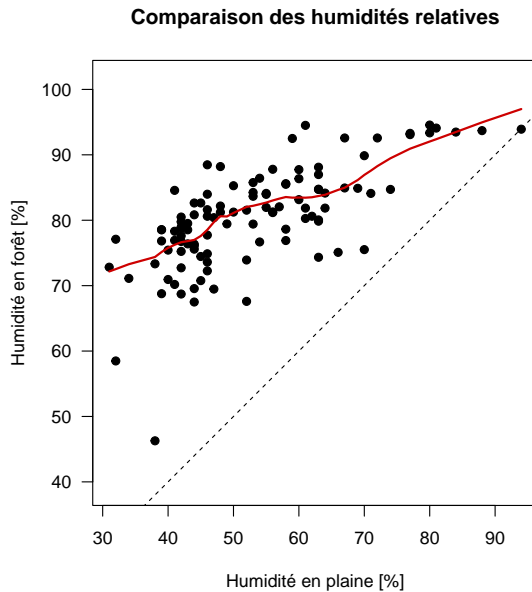
4 Les humidités relatives

4.1 Calcul

POUR le calcul de l'humidité relative nous retenons la valeur observée (en plaine ou en forêt) à l'heure de la température maximale (en plaine).

4.2 Comparaison

```
with(subset(cmph, flagTmax & valid > as.POSIXct("2024-05-01")), {
  par(pty = "s")
  plot(U, U_lbbe, asp = 1, pch = 19, las = 1,
       xlab = "Humidité en plaine [%]",
       ylab = "Humidité en forêt [%]",
       main = "Comparaison des humidités relatives")
  abline(c(0, 1), lty = 2)
  lines(lowess(U, U_lbbe, f = 1/3), col = "red3", lwd = 2)
})
```



Tous les points sont au dessus de la première bissectrice, il fait donc toujours plus humide en forêt. Nous n'avons pas de relation linéaire ici comme pour la température parce que l'on ne peut pas dépasser les 100 % d'humidité relative, et en pratique on sature à 90 % environ. Pour une humidité moyenne de 50 %, le gain est d'environ 30 % et l'on passe à 80 % d'humidité relative.

Si la température est plus basse en forêt, l'humidité y est également plus élevée. Le problème est que pour une température donnée, la sensation de chaleur est plus importante si on augmente l'humidité parce que l'on aura plus de difficulté à nous refroidir en évaporant notre sueur. Est-ce que l'augmentation d'humidité compense la diminution de température? C'est ce que nous allons chercher à déterminer dans la section suivante.

5 Les températures ressenties (*humidex*)

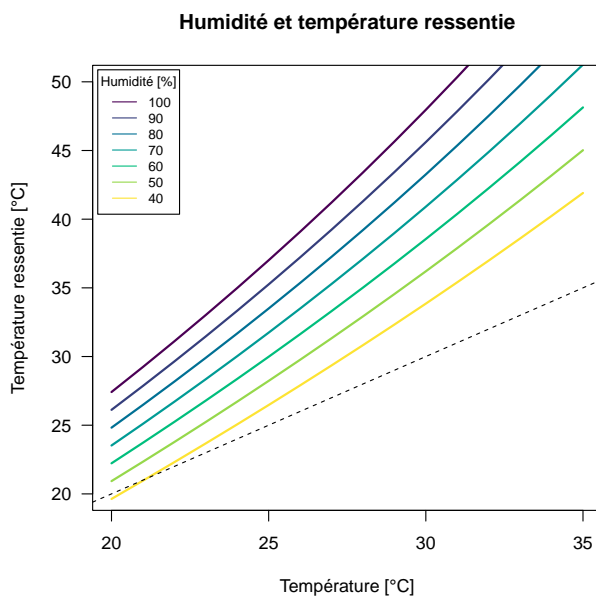
5.1 Calcul

Les analyses présentées ici doivent être prises *cum grano salis* parce que si la notion de température ressentie est assez populaire, elle est loin d'être définie de façon univoque². Nous allons utiliser l'indice *humidex* [4], une contraction formée à partir de *humidity* et de *index*, qui essaye de donner une idée de

²On pourra visionner à ce sujet la vidéo très didactique de la chaîne *science étonnante* à <https://www.youtube.com/watch?v=8bUNGL1p048>

l'impact de l'humidité sur la température ressentie quand il fait chaud. Nous le calculons avec la fonction `humidex()` du paquet `ThermIndex` [2].

```
library(ThermIndex)
Useq <- seq(40, 100, by = 10) ; nU <- length(Useq)
Tseq <- seq(20, 35, by = 1)
mycol <- rev(hcl.colors(nU))
plot.new() ; plot.window(xlim = range(Tseq), ylim = c(20, 50))
for(i in seq_len(nU)){
  lines(Tseq, humidex(Tseq, Useq[i]), col = mycol[i], lwd = 2)
}
axis(1) ; axis(2, las = 1) ; box()
abline(c(0, 1), lty = 2)
title(main = "Humidité et température ressentie",
      xlab = "Température [°C]",
      ylab = "Température ressentie [°C]")
legend("topleft", inset = 0.01, legend = rev(Useq), lty = 1,
      col = rev(mycol), cex = 0.75, title = "Humidité [%]")
```

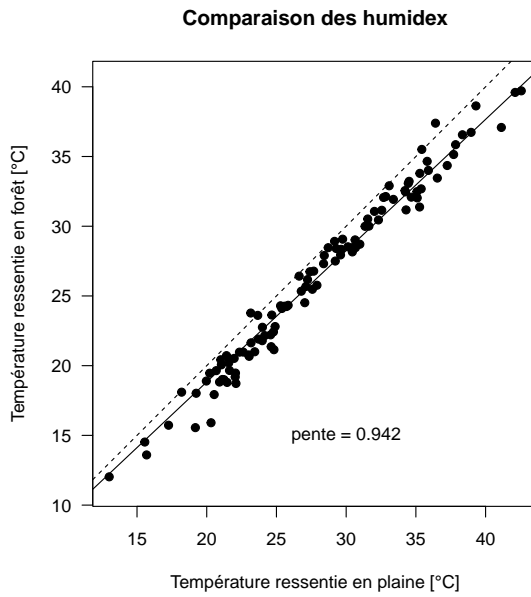


ANSI, dans la gamme des valeurs qui nous intéresse, la température ressentie est toujours plus élevée que la température réelle, et ce d'autant plus que la température et l'humidité sont importantes.

5.2 Comparaison

```
cmph$hmx <- with(cmph, humidex(T, U))
cmph$hmx_lbbe <- with(cmph, humidex(T_lbbe, U_lbbe))

with(subset(cmph, flagTmax & valid > as.POSIXct("2024-05-01")), {
  par(pty = "s")
  plot(hmx, hmx_lbbe, asp = 1, pch = 19, las = 1,
       xlab = "Température ressentie en plaine [°C]",
       ylab = "Température ressentie en forêt [°C]",
       main = "Comparaison des humidex")
  abline(c(0, 1), lty = 2)
  abline(lm0 <- lm(hmx_lbbe~hmx-1))
  text(30, 15, paste("pente =", signif(coef(lm0)[1], 3)))
})
```

EN termes de températures ressenties, l'avantage reste donc à la forêt, mais s'il est moins prononcé que pour les températures (section 3 page 5). La pente de la droite de régression par l'origine est de 0.942, ce qui signifie que l'on gagne environ 0.058 degré par degré, par exemple à 35 °C on gagne 2.0 degrés.

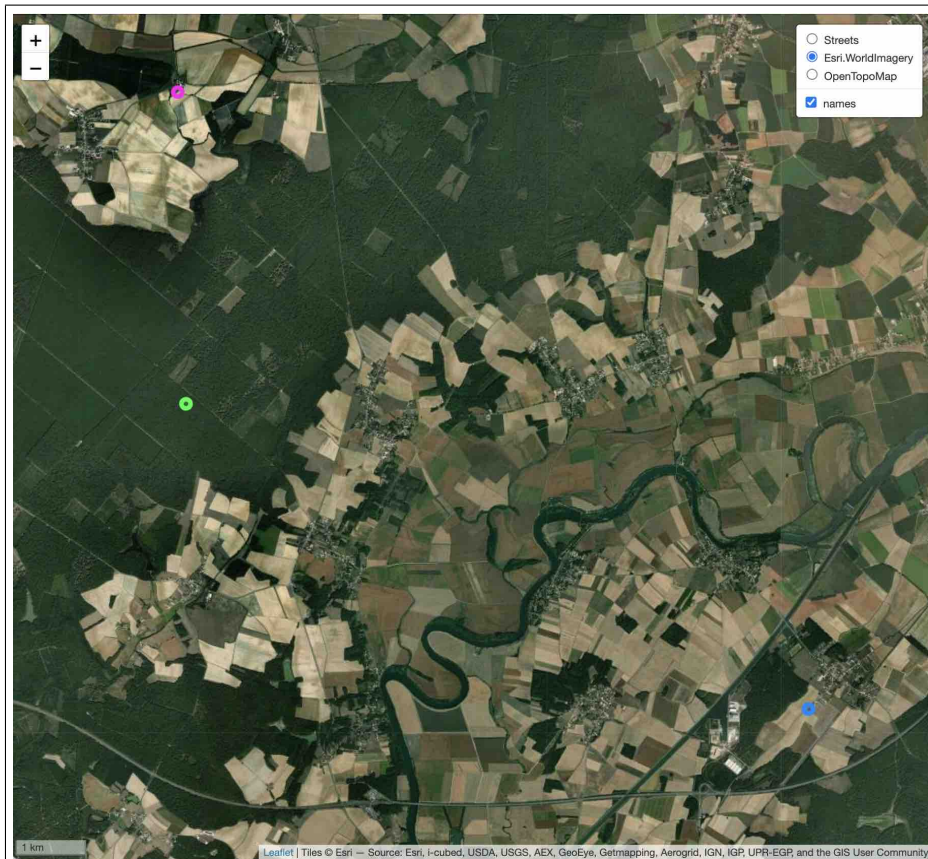


FIGURE 2 : Plan de situation des stations météo avec des photos aériennes. Les points d'intérêt sont les mêmes que sur la figure 1 page 3.

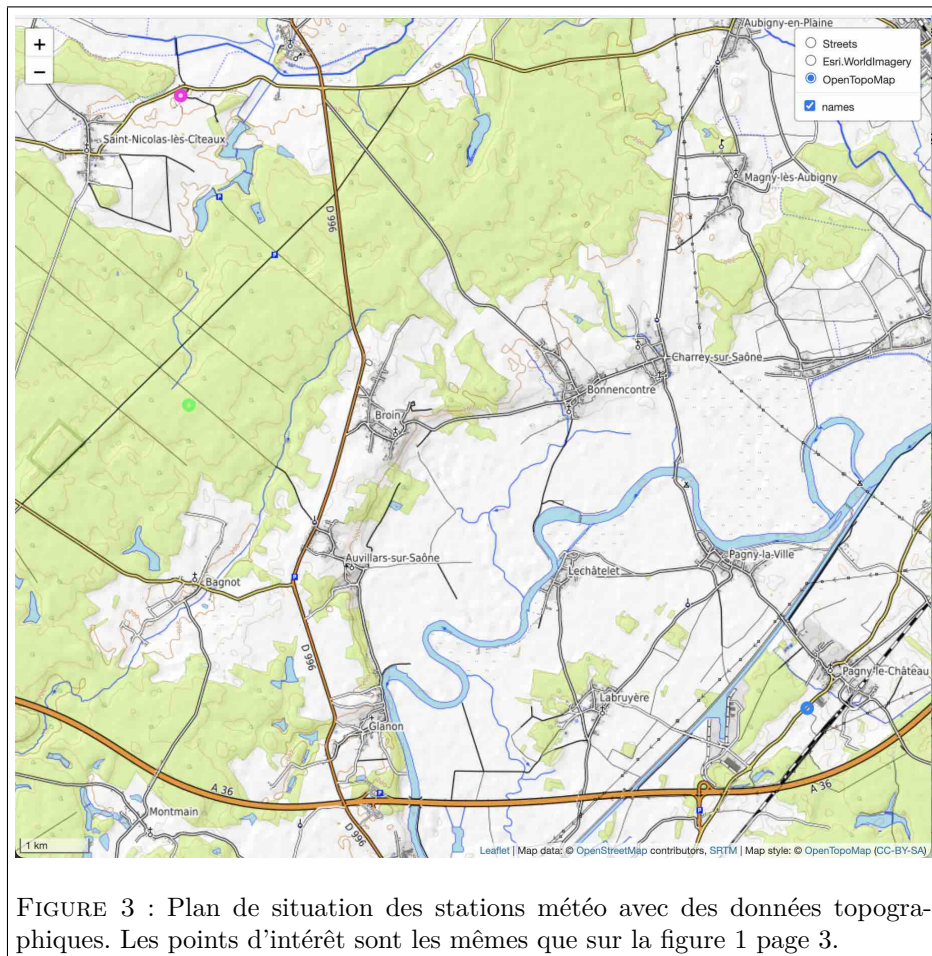


FIGURE 3 : Plan de situation des stations météo avec des données topographiques. Les points d'intérêt sont les mêmes que sur la figure 1 page 3.

Références

- [1] J. Čermák, J. Ulehla, J. Kučera, and M. Penka. Sap flow rate and transpiration dynamics in the full-grown oak (*Quercus robus* L.) in floodplain forest exposed to seasonal floods as related to potential evapotranspiration and tree dimensions. *Biologia Plantarum*, 24(6) :446–460, 1982.
- [2] Francisco Jablinski Castelhana/Laboclima Universidade Federal do Paraná. *ThermIndex : Calculate Thermal Indexes*, 2017. R package version 0.2.0.
- [3] F. Lebourgeois, J. Differt, A. Granier, N. Bréda, and E. Ulrich. Premières observations phénologiques des peuplements du réseau national de suivi à long terme des écosystèmes forestiers (RENECOFOR). *Revue forestière française*, 54(5) :407–418, 2002.
- [4] J.M. Masterton and F.A. Richardson. Humidex : a method of quantifying human discomfort due to excessive heat and humidity. Technical report, Environment Canada, Downsview, ON, Canada, 1979.