

Travail de fin d'études / Projet de fin d'études : Benchmark d'émissions carbone et classification typologique de bâtiments résidentiels neufs surbase de leur impact sur le réchauffement climatique

Auteur : Forey, Simon

Promoteur(s) : Reiter, Sigrid

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

Diplôme : Master en ingénieur civil architecte, à finalité spécialisée en ingénierie architecturale et urbaine

Année académique : 2024-2025

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/23251>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

Annexe du travail de fin d'études

FOREY Simon

Promotrice :

REITER Sigrid

Année académique : **2024 – 2025**

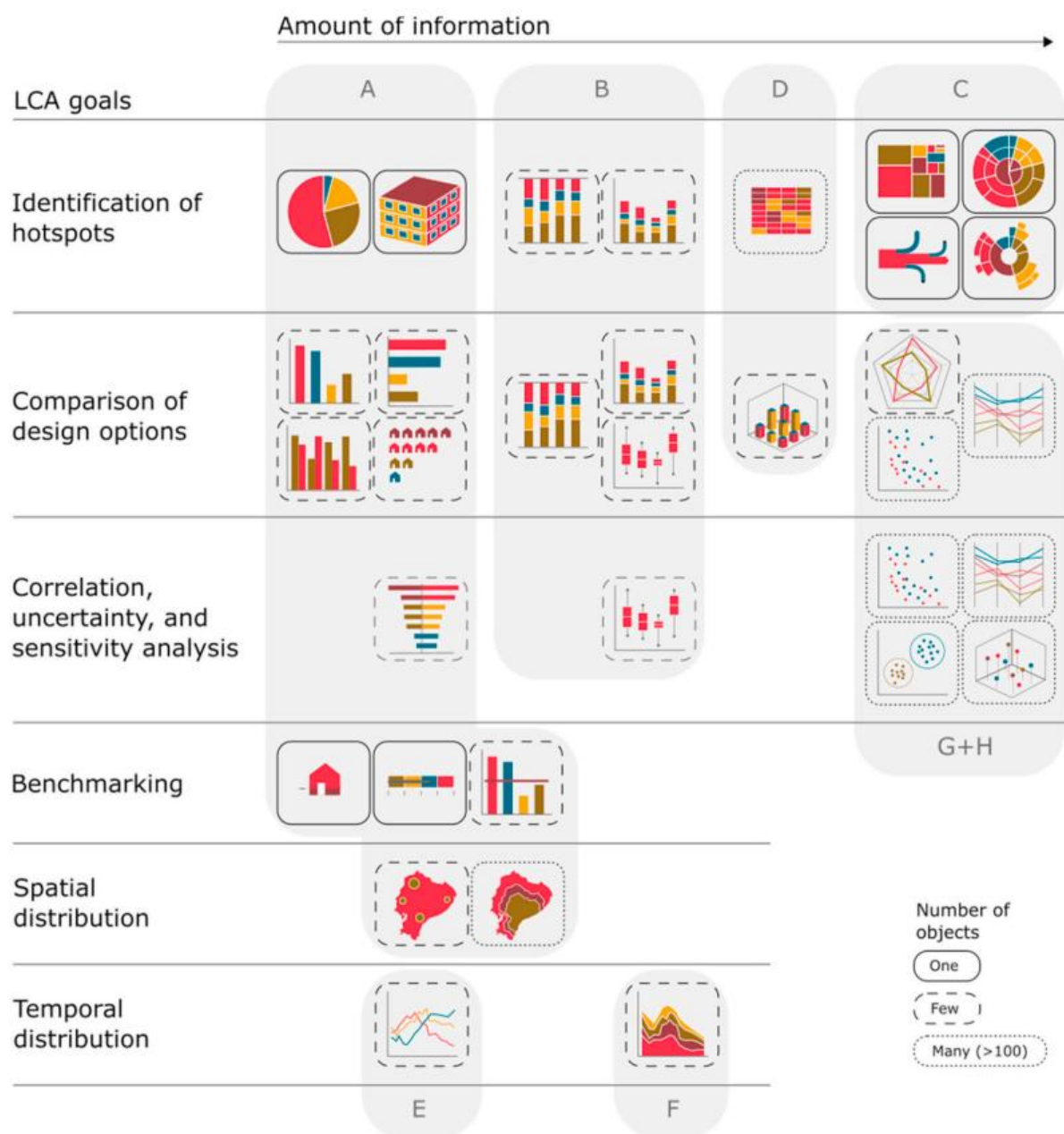


Figure 16 Synthèse des objectifs de l'ACV, des groupes de types de visualisation et de la quantité d'information représentée dans la visualisation (Hollberg et al., 2021)

```
# regression linéaire multiple #  
# chargement des données #  
setwd("C:/Users/yesis/OneDrive/Documents/Études/Travail/ULiège/M2/Q2/TFE")  
data <- read.delim("analyse.txt", header = TRUE, fileEncoding = "latin1")  
View(data)  
# précision données qualitatives #  
cols <- c("usage_princ", "struct_princ", "matériau_princ", "façade", "toiture",  
          "menuiserie", "ventil_princ", "chauf_princ", "ecs_princ", "clim",  
          "nrj_princ", "pp", "émet_chauf_princ")  
data[cols] <- lapply(data[cols], as.factor)
```

Extrait de code 1 Chargement des données réalisé dans le logiciel R

```

# régression multiple pour les eges #
mod <- lm(eges ~ chauff_princ + clim + ecs_princ + émet_chauf_princ + façade +
          matériau_princ + menuiserie + nrj_princ + pp + struct_princ +
          toiture + usage_princ + ventil_princ, data = data)

# analyse de modèle #
summary(mod)

# on remarque que nrj_princgaz a été exclue par redondance avec chauff_princ
# on va donc analyser la corrélation entre chauff_princ et nrj_princ

# création d'un tableau croisé
table(data$chauf_princ, data$nrj_princ)

# confirmation statistique par test du chi carré
chisq.test(table(data$chauf_princ, data$nrj_princ))

# nouveau modèle sans nrj_princ
modv1 <- lm(eges ~ chauff_princ + clim + ecs_princ + émet_chauf_princ + façade +
            matériau_princ + menuiserie + pp + struct_princ + toiture + usage_princ +
            ventil_princ, data = data)
summary(modv1)

# sélection de variables selon le critère AIC #
library(MASS)
mod_step <- stepAIC(modv1)
summary(mod_step)

# hypothèse d'application : normalité des résidus #
hist(mod_step$residuals)
library(car)
qqnorm(mod_step$residuals, main = "QQ-plot des résidus")
qqline(mod_step$residuals, col = "red")
shapiro.test(mod_step$residuals)

```

Extrait de code 6a Régression multiple pour les EGES

```

> summary(mod)

Call:
lm(formula = eges ~ chauff_princ + clim + ecs_princ + émet_chauf_princ +
    façade + matériau_princ + menuiserie + nrj_princ + pp +
    struct_princ + toiture + usage_princ + ventil_princ, data = data)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-11.8447  -2.2005   0.1924   2.2611  10.4149

Coefficients: (1 not defined because of singularities)

              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)      18.0886     1.7885  10.114 < 2e-16 ***
chauf_princchaudière_gaz      6.5044     1.2006   5.418 1.02e-07 ***
chauf_princÉlectrique     -5.3627     1.8633  -2.878 0.004205 **
chauf_princPompe_à_chaleur  -2.7058     1.6186  -1.672 0.095333 .
climoui           2.8400     0.6674   4.255 2.58e-05 ***
ecs_princchaudière_gaz      1.8260     0.5358   3.408 0.000718 ***
ecs_princchauffe_eau_électrique  1.4238     0.5174   2.752 0.006181 **
émet_chauf_princhydrau      0.3949     1.0372   0.381 0.703588
façadematériau_biosourcé    -1.6168     1.0667  -1.516 0.130341
façadeterre_cuite     -2.5527     0.5771  -4.424 1.24e-05 ***
matériau_princbois     -0.6386     1.1170  -0.572 0.567847
matériau_princterre_cuite    2.0151     0.5783   3.484 0.000545 ***
menuiseriebois     -3.9375     0.8771  -4.489 9.25e-06 ***
menuiseriepvc     -1.1109     0.4282  -2.594 0.009812 **
nrj_princelec       4.4252     1.1394   3.884 0.000119 ***
nrj_princgaz              NA              NA              NA              NA
ppoui              2.9403     0.5134   5.728 1.95e-08 ***
struct_princsyst_ossature   -0.1502     0.7091  -0.212 0.832327
struct_princvoiles_porteurs -0.5518     0.5574  -0.990 0.322836
toiturepente_simple      1.8478     0.5118   3.610 0.000343 ***
toituretoiture_plate     -0.5306     0.6442  -0.824 0.410650
usage_princmaison_indiv    -3.1575     0.5602  -5.636 3.20e-08 ***
ventil_princvmc_simple_flux  2.6144     1.3110   1.994 0.046778 *

Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 3.621 on 419 degrees of freedom

Multiple R-squared:  0.593,    Adjusted R-squared:  0.5726

F-statistic: 29.07 on 21 and 419 DF,  p-value: < 2.2e-16

```

Extrait de code 1 Résultat du premier modèle de la régression linéaire pour l'EGES

```

> summary(modv1)

Call:
lm(formula = eges ~ chauff_princ + clim + ecs_princ + émet_chauf_princ +
    façade + matériau_princ + menuiserie + pp + struct_princ +
    toiture + usage_princ + ventil_princ, data = data)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-11.5766  -2.3381   0.1946   2.2498  13.5509

Coefficients:
                Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)         17.7644     1.8163   9.781 < 2e-16 ***
chauf_princchaudière_gaz      6.6425     1.2201   5.444 8.86e-08 ***
chauf_princÉlectrique     -1.0585     1.5228  -0.695 0.487372
chauf_princPompe_à_chaleur    1.6519     1.1861   1.393 0.164437
climoui                 2.5088     0.6729   3.728 0.000219 ***
ecs_princchaudière_gaz      2.1871     0.5364   4.077 5.46e-05 ***
ecs_princchauffe_eau_électrique 1.3985     0.5260   2.659 0.008139 **
émet_chauf_princhydrau      0.4668     1.0543   0.443 0.658170
façadematériau_biosourcé   -1.9583     1.0807  -1.812 0.070703 .
façadeterre_cuite        -2.4710     0.5863  -4.215 3.06e-05 ***
matériau_princbois        -0.2022     1.1298  -0.179 0.858048
matériau_princterre_cuite    1.9663     0.5878   3.345 0.000896 ***
menuiseriebois          -2.8221     0.8425  -3.350 0.000883 ***
menuiseriepvc           -1.0570     0.4351  -2.429 0.015543 *
ppoui                   2.5515     0.5119   4.985 9.10e-07 ***
struct_princsys_ossature   -0.4963     0.7152  -0.694 0.488093
struct_princvoiles_porteurs -0.9806     0.5555  -1.765 0.078235 .
toiturepente_simple       1.8939     0.5202   3.641 0.000306 ***
toituretoiture_plate     -0.3344     0.6529  -0.512 0.608839
usage_princmaison_indiv   -3.2986     0.5684  -5.804 1.28e-08 ***
ventil_princvmc_simple_flux  3.0096     1.3288   2.265 0.024026 *
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 3.682 on 420 degrees of freedom

Multiple R-squared:  0.5783,    Adjusted R-squared:  0.5583

F-statistic: 28.8 on 20 and 420 DF,  p-value: < 2.2e-16

```

```

# hypothèse d'application : homoscedasticité #
plot(mod_step$fitted.values, mod_step$residuals,
      xlab = "Valeurs ajustées", ylab = "Résidus",
      main = "Résidus vs Valeurs ajustées")
abline(h = 0, col = "red")

# test de Breusch-Pagan #
library(lmtest)
bptest(mod_step)

# méthode white car hétéroscédasticité significative #
library(sandwich)
coeftest(mod_step, vcov = vcovHC(mod_step, type = "HC1"))

# nouvelles modalités de référence pour habitation "low-carbon" #
data$chauf_princ <- relevel(data$chauf_princ, ref = "Électrique")
data$façade <- relevel(data$façade, ref = "terre_cuite")
data$matériau_princ <- relevel(data$matériau_princ, ref = "bois")
data$menuiserie <- relevel(data$menuiserie, ref = "bois")
data$toiture <- relevel(data$toiture, ref = "toiture_plate")
data$usage_princ <- relevel(data$usage_princ, ref = "maison_indiv")

# nouveau modèle avec ces références
modv2 <- lm(eges ~ chauf_princ + clim + ecs_princ + façade +
            matériau_princ + menuiserie + pp +
            toiture + usage_princ + ventil_princ, data = data)

# application de la correction robuste
coeftest(modv2, vcov = vcovHC(modv2, type = "HC1"))

# vérifier la présence de multicollinéarité entre les variables explicatives
# sur modèle complet
vif(modv1)
# sur modèle restreint
vif(modv2)

```

```
> coeftest(modv2, vcov = vcovHC(modv2, type = "HC1"))
```

t test of coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	7.77019	1.52809	5.0849	5.536e-07	***
chauf_princbois	0.88071	1.26208	0.6978	0.4856727	
chauf_princchaudière_gaz	7.60565	0.93099	8.1694	3.619e-15	***
chauf_princPompe_à_chaleur	2.67800	0.87884	3.0472	0.0024545	**
climoui	2.47023	1.05461	2.3423	0.0196275	*
ecs_princchaudière_gaz	2.15108	0.55610	3.8681	0.0001269	***
ecs_princchauffe_eau_électrique	1.36442	0.49392	2.7624	0.0059873	**
façadebéton	2.30161	0.54607	4.2148	3.058e-05	***
façadematériau_biosourcé	0.30435	1.10438	0.2756	0.7830057	
matériau_princbéton	0.40833	0.98498	0.4146	0.6786751	
matériau_princterre_cuite	2.37224	1.02193	2.3213	0.0207433	*
menuiseriealu	3.18891	0.63443	5.0264	7.391e-07	***
menuiseriepvc	2.04248	0.58326	3.5019	0.0005112	***
ppoui	2.41931	0.51019	4.7420	2.897e-06	***
toiturepente_complexe	0.21676	0.64930	0.3338	0.7386714	
toiturepente_simple	1.93485	0.61278	3.1575	0.0017052	**
usage_princlogement_col	3.21779	0.67533	4.7648	2.603e-06	***
ventil_princvmc_simple_flux	3.03464	1.17847	2.5751	0.0103611	*

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Extrait de code 3 Dernier modèle avec correction robuste de la régression multiple pour l'EGES

```

# régression multiple pour les eges pce #

mod_pce <- lm(eges_pce ~ chauff_princ + clim + ecs_princ + émet_chauf_princ +
façade +
           matériau_princ + menuiserie + pp + struct_princ +
           toiture + usage_princ + ventil_princ, data = data)

# analyse de modèle #
summary(mod_pce)

# sélection de variables selon le critère AIC #
library(MASS)
mod_step_pce <- stepAIC(mod_pce)
summary(mod_step_pce)

# hypothèse d'application : normalité des résidus #
hist(mod_step_pce$residuals)
library(car)
qqnorm(mod_step_pce$residuals, main = "QQ-plot des résidus")
qqline(mod_step_pce$residuals, col = "red")
shapiro.test(mod_step_pce$residuals)

# hypothèse d'application : homoscédasticité #
plot(mod_step_pce$fitted.values, mod_step_pce$residuals,
     xlab = "Valeurs ajustées", ylab = "Résidus",
     main = "Résidus vs Valeurs ajustées")
abline(h = 0, col = "red")

```

Extrait de code 7a Régression multiple pour les EGES PCE

```

> summary(mod_pce)

Call:
lm(formula = eges_pce ~ chauff_princ + clim + ecs_princ + émet_chauf_princ +
    façade + matériau_princ + menuiserie + pp + struct_princ +
    toiture + usage_princ + ventil_princ, data = data)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-9.6430 -1.4143  0.0131  1.4151 11.7860

Coefficients:
                                Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)                   3.1973     1.5005   2.131 0.033691 *
chauf_princbois                1.9485     1.1256   1.731 0.084182 .
chauf_princchaudière_gaz       2.1731     0.8099   2.683 0.007579 **
chauf_princPompe_à_chaleur     2.7274     0.8306   3.284 0.001110 **
climoui                       3.3496     0.4974   6.734 5.44e-11 ***
ecs_princchaudière_gaz        -0.7969     0.3965  -2.010 0.045086 *
ecs_princchauffe_eau_électrique 1.3369     0.3888   3.439 0.000643 ***
émet_chauf_princhydrau         0.6395     0.7793   0.821 0.412369
façadébéton                   2.6744     0.4334   6.171 1.60e-09 ***
façadematériau_biosourcé      2.1851     0.8949   2.442 0.015031 *
matériau_princbéton           0.7519     0.8352   0.900 0.368494
matériau_princterre_cuite     2.7288     0.9296   2.935 0.003514 **
menuiseriealu                 1.4174     0.6228   2.276 0.023359 *
menuiseriepvc                 0.6801     0.5852   1.162 0.245858
ppoui                        1.1376     0.3784   3.007 0.002801 **
struct_princsys_ossature       0.5814     0.5287   1.100 0.272036
struct_princvoiles_porteurs   -0.6201     0.4106  -1.510 0.131747
toiturepente_complexe        -0.5875     0.4826  -1.217 0.224141
toiturepente_simple           0.6898     0.4039   1.708 0.088446 .
usage_princlogement_col       1.8767     0.4201   4.467 1.02e-05 ***
ventil_princvmc_simple_flux    2.5271     0.9822   2.573 0.010429 *

---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 2.721 on 420 degrees of freedom

Multiple R-squared:  0.2813,    Adjusted R-squared:  0.2471

F-statistic: 8.221 on 20 and 420 DF,  p-value: < 2.2e-16

```

Extrait de code 8 Résultat du premier modèle de la régression linéaire pour l'EGES PCE

```

> mod_step_pce <- stepAIC(mod_pce)
Start:  AIC=903.47
eges_pce ~ chauff_princ + clim + ecs_princ + émet_chauf_princ +
         façade + matériau_princ + menuiserie + pp + struct_princ +
         toiture + usage_princ + ventil_princ

```

	Df	Sum of Sq	RSS	AIC
- émet_chauf_princ	1	4.99	3115.3	902.18
<none>			3110.4	903.47
- struct_princ	2	37.08	3147.4	904.70
- menuiserie	2	56.34	3166.7	907.39
- ventil_princ	1	49.02	3159.4	908.37
- chauff_princ	3	83.36	3193.7	909.13
- pp	1	66.94	3177.3	910.86
- toiture	2	87.74	3198.1	911.74
- matériau_princ	2	161.31	3271.7	921.77
- usage_princ	1	147.77	3258.1	921.94
- ecs_princ	2	223.50	3333.9	930.07
- façade	2	283.14	3393.5	937.89
- clim	1	335.82	3446.2	946.69

```

Step:  AIC=902.18
eges_pce ~ chauff_princ + clim + ecs_princ + façade + matériau_princ +
         menuiserie + pp + struct_princ + toiture + usage_princ +
         ventil_princ

```

	Df	Sum of Sq	RSS	AIC
<none>			3115.3	902.18
- struct_princ	2	41.33	3156.7	903.99
- menuiserie	2	59.64	3175.0	906.54
- chauff_princ	3	78.55	3193.9	907.16
- pp	1	68.81	3184.2	909.81
- toiture	2	83.57	3198.9	909.85
- ventil_princ	1	72.37	3187.7	910.31
- matériau_princ	2	158.50	3273.8	920.06
- usage_princ	1	144.48	3259.8	920.17
- ecs_princ	2	220.99	3336.3	928.40
- façade	2	283.78	3399.1	936.62
- clim	1	331.06	3446.4	944.71

```

> summary(mod_step_pce)

Call:
lm(formula = eges_pce ~ chauff_princ + clim + ecs_princ + façade +
    matériau_princ + menuiserie + pp + struct_princ + toiture +
    usage_princ + ventil_princ, data = data)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-9.6181 -1.4023  0.0443  1.4149 11.7699

Coefficients:
                                Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)                   3.6952     1.3719   2.694 0.007352 **
chauff_princbois               1.7798     1.1062   1.609 0.108404
chauff_princchaudière_gaz      2.1000     0.8046   2.610 0.009382 **
chauff_princPompe_à_chaleur    2.5963     0.8148   3.187 0.001547 **
climoui                       3.3105     0.4949   6.689 7.19e-11 ***
ecs_princchaudière_gaz        -0.8311     0.3942  -2.108 0.035585 *
ecs_princchauffe_eau_électrique 1.2954     0.3853   3.362 0.000845 ***
façadebéton                   2.6776     0.4332   6.181 1.50e-09 ***
façadematériau_biosourcé      2.1978     0.8944   2.457 0.014407 *
matériau_princbéton           0.7295     0.8344   0.874 0.382469
matériau_princterre_cuite      2.6873     0.9279   2.896 0.003973 **
menuiseriealu                 1.4147     0.6225   2.272 0.023562 *
menuiseriepvc                 0.6407     0.5830   1.099 0.272397
ppoui                         1.1521     0.3778   3.049 0.002437 **
struct_princsysst_ossature     0.6649     0.5186   1.282 0.200476
struct_princvoiles_porteurs   -0.6103     0.4103  -1.488 0.137619
toiturepente_complexe        -0.5955     0.4823  -1.234 0.217706
toiturepente_simple           0.6446     0.4000   1.612 0.107820
usage_princlogement_col        1.8501     0.4187   4.419 1.27e-05 ***
ventil_princvmc_simple_flux    2.8361     0.9069   3.127 0.001886 **

---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 2.72 on 421 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.2802,    Adjusted R-squared:  0.2477
F-statistic: 8.625 on 19 and 421 DF,  p-value: < 2.2e-16

```

Extrait de code 10 Modèle après sélection par AIC de la régression linéaire pour l'EGES PCE

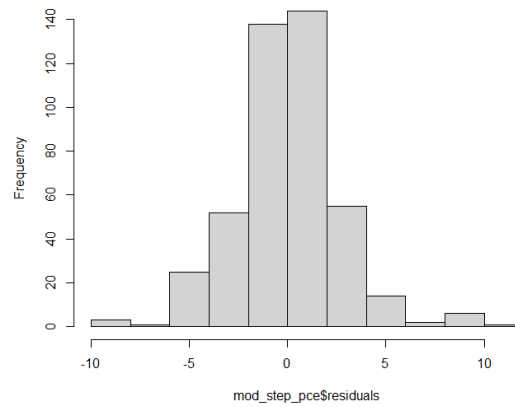


Figure 31 Histogramme des résidus de la régression linéaire pour l'EGES PCE

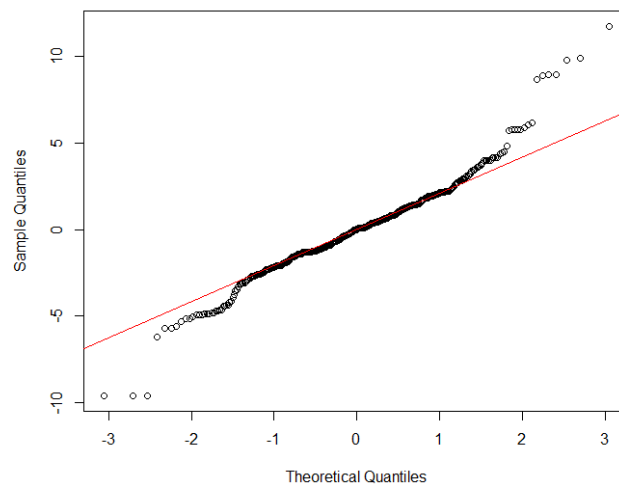


Figure 22 QQ-plot des résidus de la régression linéaire pour l'EGES PCE

```
> shapiro.test(mod_step_pce$residuals)

Shapiro-Wilk normality test
data:  mod_step_pce$residuals
W = 0.9589, p-value = 9.399e-10
```

Extrait de code 11 Test de Shapiro-Wilk de la régression linéaire pour l'EGES PCE

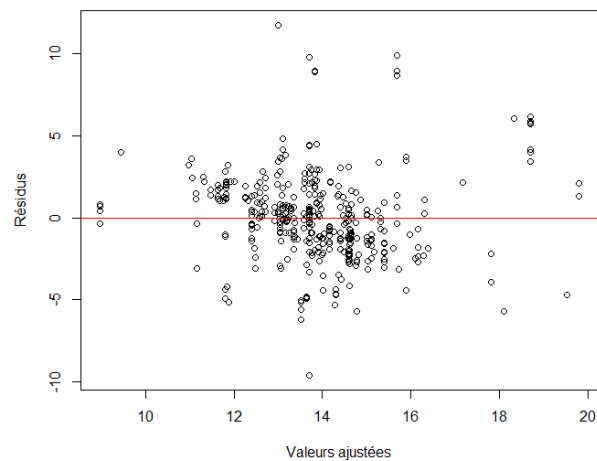


Figure 33 Homoscédasticité de la régression linéaire pour l'EGES PCE

```

# test de Breusch-Pagan #
library(lmtest)
bptest(mod_step_pce)

# méthode white car hétéroscédasticité significative #
library(sandwich)
coeftest(mod_step_pce, vcov = vcovHC(mod_step_pce, type = "HC1"))

# nouvelles modalités de référence pour habitation "low-carbon" selon pce #
data$ecs_princ      <- relevel(data$ecs_princ, ref = "chaudière_gaz")
data$struct_princ   <- relevel(data$struct_princ, ref = "voiles_porteurs")
data$toiture        <- relevel(data$toiture, ref = "pente_complexe")

# nouveau modèle avec ces références
mod_pce_v1 <- lm(eges_pce ~ chauff_princ + clim + ecs_princ + façade +
                 matériau_princ + menuiserie + pp +
                 toiture + usage_princ + ventil_princ + struct_princ, data = data)

# application de la correction robuste
coeftest(mod_pce_v1, vcov = vcovHC(mod_pce_v1, type = "HC1"))

# vérifier la présence de multicollinéarité entre les variables explicatives
# sur modèle complet
vif(mod_pce)
# sur modèle restreint
vif(mod_pce_v1)

```

Extrait de code 7b Régression multiple pour les EGES PCE

```

> bptest(mod_step_pce)

studentized Breusch-Pagan test

data:  mod_step_pce
BP = 89.064, df = 19, p-value = 4.857e-11

```

Extrait de code 12 Test de Breusch-Pagan de la régression multiple pour les EGES PCE

```
> coeftest(mod_pce_v1, vcov = vcovHC(mod_pce_v1, type = "HC1"))
```

t test of coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	1.65832	1.47967	1.1207	0.2630381
chauf_princbois	1.77975	1.12229	1.5858	0.1135317
chauf_princchaudière_gaz	2.09999	0.74750	2.8093	0.0051956 **
chauf_princPompe_à_chaleur	2.59627	0.73068	3.5532	0.0004236 ***
climoui	3.31049	0.76724	4.3148	1.993e-05 ***
ecs_princautre	0.83110	0.43969	1.8902	0.0594175 .
ecs_princchauffe_eau_électrique	2.12650	0.42716	4.9783	9.374e-07 ***
façadebéton	2.67764	0.42302	6.3298	6.294e-10 ***
façadematériau_biosourcé	2.19777	0.70856	3.1017	0.0020533 **
matériau_princbéton	0.72948	0.60924	1.1974	0.2318400
matériau_princterre_cuite	2.68732	0.68495	3.9234	0.0001019 ***
menuiseriealu	1.41469	0.49989	2.8300	0.0048776 **
menuiseriepvc	0.64072	0.47214	1.3571	0.1754918
ppoui	1.15212	0.43861	2.6268	0.0089346 **
toituretoiture_plate	0.59546	0.46625	1.2771	0.2022614
toiturepente_simple	1.24008	0.27914	4.4425	1.138e-05 ***
usage_princlogement_col	1.85014	0.51774	3.5735	0.0003931 ***
ventil_princvmc_simple_flux	2.83607	1.09620	2.5872	0.0100104 *
struct_princmaçonnerie	0.61029	0.37220	1.6397	0.1018210
struct_princsyst_ossature	1.27521	0.52117	2.4468	0.0148193 *

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Extrait de code 13 Dernier modèle avec correction robuste de la régression multiple pour l'EGES PCE

```

> vif(mod_pce)

              GVIF Df GVIF^(1/(2*Df))
chauf_princ    3.408333  3      1.226753
clim           1.215221  1      1.102371
ecs_princ      2.317502  2      1.233829
emet_chauf_princ 1.416004  1      1.189960
façade         8.084630  2      1.686223
matériau_princ 8.949840  2      1.729632
menuiserie     2.060964  2      1.198168
pp             1.991439  1      1.411184
struct_princ   2.332625  2      1.235837
toiture        1.898029  2      1.173750
usage_princ    1.693109  1      1.301195
ventil_princ   2.129339  1      1.459226

> # sur modèle restreint
> vif(mod_pce_v1)

              GVIF Df GVIF^(1/(2*Df))
chauf_princ    3.186325  3      1.213058
clim           1.204049  1      1.097292
ecs_princ      2.273313  2      1.227905
façade         8.082206  2      1.686097
matériau_princ 8.913666  2      1.727882
menuiserie     2.013459  2      1.191203
pp             1.987074  1      1.409636
toiture        1.848605  2      1.166034
usage_princ    1.683096  1      1.297342
ventil_princ   1.816491  1      1.347773
struct_princ   2.243784  2      1.223898

```

Extrait de code 14 Indice d'inflation de la variance (Vif) sur modèle global puis sur modèle restreint de la régression multiple pour l'EGES PCE

```

# régression multiple pour les eges ope #
mod_ope <- lm(eges_ope ~ chauff_princ + clim + ecs_princ + émet_chauf_princ +
façade +
          matériau_princ + menuiserie + pp + struct_princ +
          toiture + usage_princ + ventil_princ, data = data)

# analyse de modèle #
summary(mod_ope)

# sélection de variables selon le critère AIC #
library(MASS)
mod_step_ope <- stepAIC(mod_ope)
summary(mod_step_ope)

# hypothèse d'application : normalité des résidus #
hist(mod_step_ope$residuals)
library(car)
qqnorm(mod_step_ope$residuals, main = "QQ-plot des résidus")
qqline(mod_step_ope$residuals, col = "red")
shapiro.test(mod_step_ope$residuals)

# hypothèse d'application : homoscédasticité #
plot(mod_step_ope$fitted.values, mod_step_ope$residuals,
      xlab = "Valeurs ajustées", ylab = "Résidus",
      main = "Résidus vs Valeurs ajustées")
abline(h = 0, col = "red")

```

Extrait de code 8a Régression multiple pour les EGES OPE

```

> summary(mod_ope)

Call:
lm(formula = eges_ope ~ chauff_princ + clim + ecs_princ + émet_chauf_princ +
    façade + matériau_princ + menuiserie + pp + struct_princ +
    toiture + usage_princ + ventil_princ, data = data)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-9.7399 -1.1509  0.0427  1.1661  7.0149

Coefficients:
                                Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)                   7.92325     1.19352   6.639 9.81e-11 ***
chauf_princbois                -0.88684     0.85269  -1.040  0.29892
chauf_princchaudière_gaz       5.52940     0.61351   9.013 < 2e-16 ***
chauf_princPompe_à_chaleur    -0.01488     0.62921  -0.024  0.98115
climoui                       -0.84088     0.37682  -2.232  0.02617 *
ecs_princautre                -2.98463     0.30038  -9.936 < 2e-16 ***
ecs_princchauffe_eau_électrique -2.92181     0.29844  -9.790 < 2e-16 ***
émet_chauf_princhydrau        -0.17273     0.59038  -0.293  0.76999
façadébéton                   -0.20280     0.32830  -0.618  0.53708
façadematériau_biosourcé     -1.67209     0.67793  -2.466  0.01404 *
matériau_princbéton          -0.54904     0.63266  -0.868  0.38599
matériau_princterre_cuite    -0.55965     0.70420  -0.795  0.42722
menuiseriealu                 1.40522     0.47178   2.979  0.00306 **
menuiseriepvc                 1.08645     0.44331   2.451  0.01466 *
ppoui                         1.41520     0.28663   4.937 1.14e-06 ***
struct_princmaçonnerie        0.36082     0.31104   1.160  0.24669
struct_princsyst_ossature     -0.71855     0.42390  -1.695  0.09080 .
toituretoiture_plate         -0.92207     0.36561  -2.522  0.01204 *
toiturepente_simple           0.61604     0.29129   2.115  0.03503 *
usage_princlogement_col       1.42273     0.31826   4.470 1.01e-05 ***
ventil_princvmc_simple_flux   0.48142     0.74408   0.647  0.51798
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 2.062 on 420 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.7924,    Adjusted R-squared:  0.7825
F-statistic: 80.16 on 20 and 420 DF,  p-value: < 2.2e-16

```

Extrait de code 15 Résultat du premier modèle de la régression linéaire pour l'EGES OPE

```

> mod_step_ope <- stepAIC(mod_ope)
Start:  AIC=658.55
eges_ope ~ chauff_princ + clim + ecs_princ + émet_chauf_princ +
         façade + matériau_princ + menuiserie + pp + struct_princ +
         toiture + usage_princ + ventil_princ

```

	Df	Sum of Sq	RSS	AIC
- matériau_princ	2	3.22	1788.1	655.35
- émet_chauf_princ	1	0.36	1785.3	656.64
- ventil_princ	1	1.78	1786.7	656.99
<none>			1784.9	658.55
- façade	2	27.17	1812.1	661.22
- clim	1	21.16	1806.1	661.75
- struct_princ	2	31.36	1816.3	662.23
- menuiserie	2	37.90	1822.8	663.82
- usage_princ	1	84.93	1869.8	677.05
- toiture	2	110.67	1895.6	681.08
- pp	1	103.60	1888.5	681.43
- ecs_princ	2	545.44	2330.3	772.15
- chauff_princ	3	1783.34	3568.3	958.04

```

Step:  AIC=655.35
eges_ope ~ chauff_princ + clim + ecs_princ + émet_chauf_princ + façade +
menuiserie + pp + struct_princ + toiture + usage_princ + ventil_princ

```

	Df	Sum of Sq	RSS	AIC
- émet_chauf_princ	1	0.29	1788.4	653.42
- ventil_princ	1	0.98	1789.1	653.59
<none>			1788.1	655.35
- struct_princ	2	29.13	1817.3	658.47
- clim	1	22.10	1810.2	658.76
- façade	2	36.47	1824.6	660.25
- menuiserie	2	41.78	1829.9	661.53
- usage_princ	1	82.00	1870.1	673.12
- toiture	2	109.37	1897.5	677.53
- pp	1	112.67	1900.8	680.29
- ecs_princ	2	557.07	2345.2	770.95
- chauff_princ	3	1806.16	3594.3	957.24

```

Step:  AIC=653.42

```

Extrait de code 16 Deux premières étapes de la sélection de variables selon le critère AIC de la régression linéaire pour l'EGES OPE

```
eges_ope ~ chauff_princ + clim + ecs_princ + façade + menuiserie +
  pp + struct_princ + toiture + usage_princ + ventil_princ
```

	Df	Sum of Sq	RSS	AIC
- ventil_princ	1	0.71	1789.1	651.59
<none>			1788.4	653.42
- clim	1	21.82	1810.2	656.77
- struct_princ	2	31.90	1820.3	657.22
- façade	2	37.29	1825.7	658.52
- menuiserie	2	41.77	1830.2	659.60
- usage_princ	1	83.36	1871.8	671.51
- toiture	2	113.79	1902.2	676.62
- pp	1	112.38	1900.8	678.29
- ecs_princ	2	559.81	2348.2	769.52
- chauff_princ	3	1841.47	3629.9	959.59

Step: AIC=651.59

```
eges_ope ~ chauff_princ + clim + ecs_princ + façade + menuiserie +
  pp + struct_princ + toiture + usage_princ
```

	Df	Sum of Sq	RSS	AIC
<none>			1789.1	651.59
- clim	1	23.50	1812.6	655.35
- struct_princ	2	36.70	1825.8	656.55
- façade	2	42.01	1831.1	657.83
- menuiserie	2	54.77	1843.9	660.89
- usage_princ	1	85.48	1874.6	670.18
- toiture	2	115.49	1904.6	675.18
- pp	1	112.02	1901.2	676.38
- ecs_princ	2	575.61	2364.7	770.61
- chauff_princ	3	1910.68	3699.8	966.00

Extrait de code 17 Dernières étapes de la sélection de variables selon le critère AIC de la régression linéaire pour l'EGES OPE

```
> summary(mod_step_ope)
```

Call:

```
lm(formula = eges_ope ~ chauff_princ + clim + ecs_princ + façade +  
    menuiserie + pp + struct_princ + toiture + usage_princ, data = data)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-9.803	-1.149	0.018	1.153	7.014

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	7.565896	0.833316	9.079	< 2e-16 ***
chauf_princbois	-0.778405	0.818673	-0.951	0.342241
chauf_princchaudière_gaz	5.522570	0.562316	9.821	< 2e-16 ***
chauf_princPompe_à_chaleur	0.001323	0.581059	0.002	0.998184
climoui	-0.861412	0.365052	-2.360	0.018742 *
ecs_princautre	-3.034509	0.294569	-10.302	< 2e-16 ***
ecs_princchauffe_eau_électrique	-2.944310	0.292357	-10.071	< 2e-16 ***
façadebéton	-0.169310	0.247238	-0.685	0.493840
façadematériau_biosourcé	-1.294324	0.417566	-3.100	0.002066 **
menuiseriealu	1.537619	0.428994	3.584	0.000377 ***
menuiseriepvc	1.246499	0.390462	3.192	0.001516 **
ppoui	1.432542	0.278035	5.152	3.95e-07 ***
struct_princmaçonnerie	0.325356	0.307063	1.060	0.289941
struct_princsyst_ossature	-0.727789	0.384356	-1.894	0.058969 .
toituretoiture_plate	-0.910561	0.362182	-2.514	0.012303 *
toiturepente_simple	0.633759	0.288054	2.200	0.028336 *
usage_princlogement_col	1.401288	0.311343	4.501	8.76e-06 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 2.054 on 424 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.7919, Adjusted R-squared: 0.7841

F-statistic: 100.9 on 16 and 424 DF, p-value: < 2.2e-16

Extrait de code 18 Modèle après sélection par AIC de la régression linéaire pour l'EGES OPE

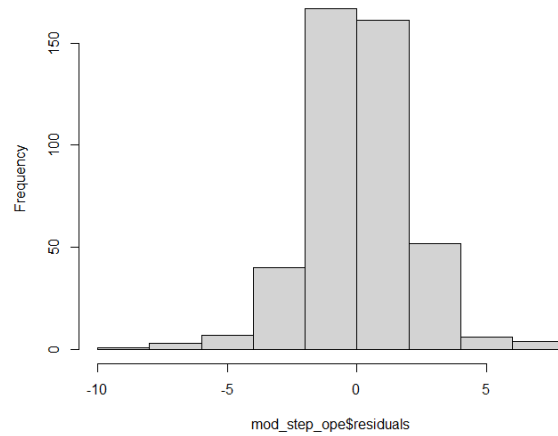


Figure 34 Histogramme des résidus de la régression linéaire pour l'EGES OPE

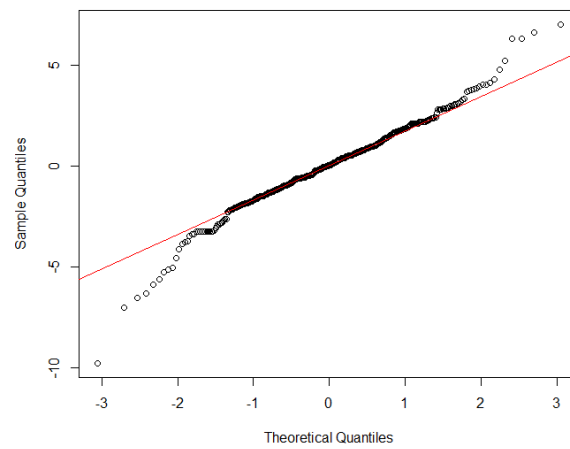


Figure 35 QQ-plot des résidus de la régression linéaire pour l'EGES OPE

```
> shapiro.test(mod_step_ope$residuals)

      Shapiro-Wilk normality test

data:  mod_step_ope$residuals
W = 0.97517, p-value = 7.804e-07
```

Extrait de code 19 Test de Shapiro-Wilk de la régression linéaire pour l'EGES OPE

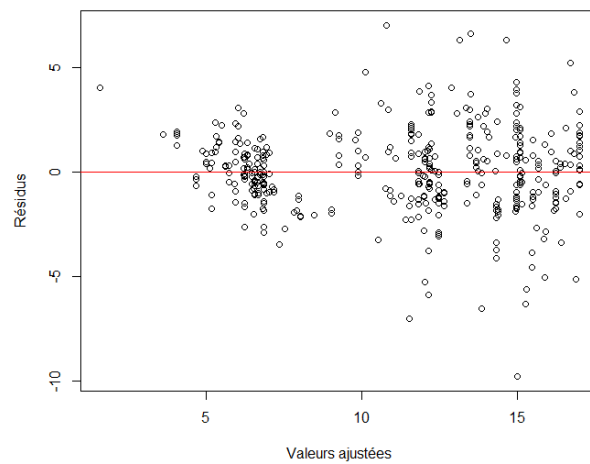


Figure 36 Homoscédasticité de la régression linéaire pour l'EGES OPE

```

# test de Breusch-Pagan #
library(lmtest)
bptest(mod_step_ope)

# méthode white car hétéroscédasticité significative #
library(sandwich)
coeftest(mod_step_ope, vcov = vcovHC(mod_step_ope, type = "HC1"))

# nouvelles modalités de référence pour habitation "low-carbon" selon ope #
data$chauf_princ      <- relevel(data$chauf_princ, ref = "bois")
data$clim             <- relevel(data$clim, ref = "oui")
data$secs_princ       <- relevel(data$secs_princ, ref = "autre")
data$façade           <- relevel(data$façade, ref = "matériau_biosourcé")
data$struct_princ     <- relevel(data$struct_princ, ref = "syst_ossature")
data$toiture          <- relevel(data$toiture, ref = "toiture_plate")

# nouveau modèle avec ces références
mod_ope_v1 <- lm(eges_ope ~ chauf_princ + clim + secs_princ + façade +
menuiserie + pp + struct_princ +
                toiture + usage_princ, data = data)

# application de la correction robuste
coeftest(mod_ope_v1, vcov = vcovHC(mod_ope_v1, type = "HC1"))

# vérifier la présence de multicollinéarité entre les variables explicatives
# sur modèle complet
vif(mod_ope)
# sur modèle restreint
vif(mod_ope_v1)

```

Extrait de code 8b Régression multiple pour les EGES OPE

```

> bptest(mod_step_ope)

studentized Breusch-Pagan test

data:  mod_step_ope
BP = 45.143, df = 16, p-value = 0.000132

```

Extrait de code 20 Test de Breusch-Pagan de la régression multiple pour les EGES OPE

```
> coeftest(mod_ope_v1, vcov = vcovHC(mod_ope_v1, type = "HC1"))
```

t test of coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	-0.041103	1.018627	-0.0404	0.9678316	
chauf_princÉlectrique	0.778405	0.660316	1.1788	0.2391239	
chauf_princchaudière_gaz	6.300975	0.633603	9.9447	< 2.2e-16	***
chauf_princPompe_à_chaleur	0.779728	0.597225	1.3056	0.1924012	
climnon	0.861412	0.410250	2.0997	0.0363435	*
ecs_princchaudière_gaz	3.034509	0.337148	9.0005	< 2.2e-16	***
ecs_princchauffe_eau_électrique	0.090199	0.274360	0.3288	0.7424979	
façadeterre_cuite	1.294324	0.392062	3.3013	0.0010437	**
façadebéton	1.125014	0.365401	3.0788	0.0022130	**
menuiseriealu	1.537619	0.389981	3.9428	9.420e-05	***
menuiseriepvc	1.246499	0.335073	3.7201	0.0002259	***
ppoui	1.432542	0.312727	4.5808	6.098e-06	***
struct_princvoiles_porteurs	0.727789	0.360110	2.0210	0.0439058	*
struct_princmaçonnerie	1.053145	0.340455	3.0933	0.0021100	**
toiturepente_complexe	0.910561	0.430973	2.1128	0.0352017	*
toiturepente_simple	1.544319	0.389699	3.9628	8.689e-05	***
usage_princlogement_col	1.401288	0.398978	3.5122	0.0004921	***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Extrait de code 21 Dernier modèle avec correction robuste de la régression multiple pour l'EGES OPE

```

> # sur modèle complet
> vif(mod_ope)

          GVIF Df GVIF^(1/(2*Df))
chauf_princ    3.408333  3      1.226753
clim           1.215221  1      1.102371
ecs_princ      2.317502  2      1.233829
émet_chauf_princ 1.416004  1      1.189960
façade         8.084630  2      1.686223
matériau_princ  8.949840  2      1.729632
menuiserie     2.060964  2      1.198168
pp            1.991439  1      1.411184
struct_princ   2.332625  2      1.235837
toiture        1.898029  2      1.173750
usage_princ    1.693109  1      1.301195
ventil_princ   2.129339  1      1.459226

> # sur modèle restreint
> vif(mod_ope_v1)

          GVIF Df GVIF^(1/(2*Df))
chauf_princ    2.643451  3      1.175877
clim           1.148681  1      1.071765
ecs_princ      2.152132  2      1.211204
façade         1.870615  2      1.169489
menuiserie     1.561075  2      1.117779
pp            1.887156  1      1.373738
struct_princ   1.798427  2      1.158039
toiture        1.823665  2      1.162081
usage_princ    1.631903  1      1.277459

```

Extrait de code 22 Indice d'inflation de la variance (Vif) sur modèle global puis sur modèle restreint de la régression multiple pour l'EGES PCE

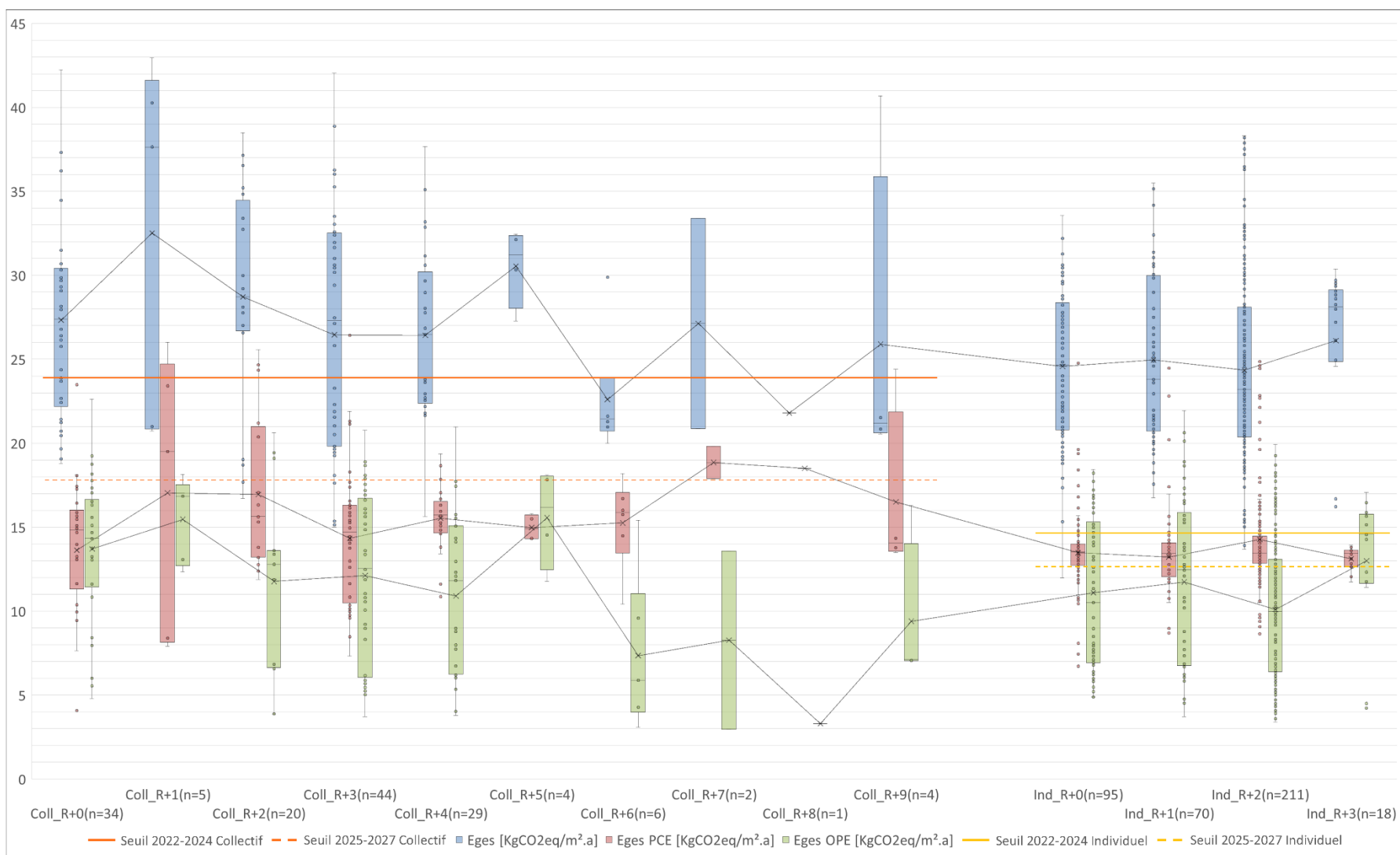


Figure 30 Comparaison des émissions de gaz à effet de serre (GES) entre typologies de bâtiments résidentiels et selon leur hauteur (nombre d'étages au-dessus du rez-de-chaussée)

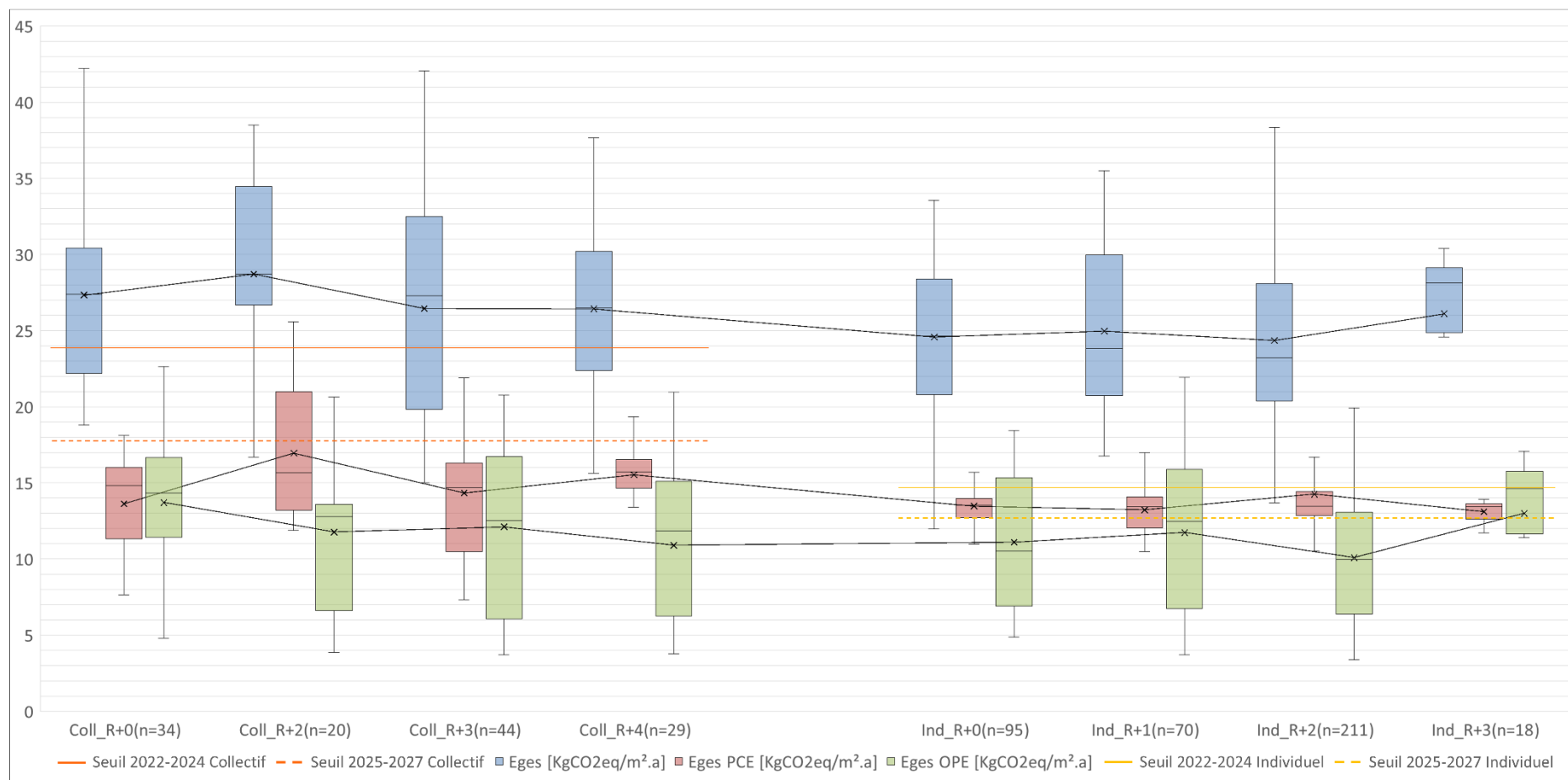


Figure 23 Comparaison des émissions de gaz à effet de serre (Eges) par typologie et hauteur de bâtiment ($n \geq 1$)

Tableau 8 Statistiques descriptives et valeurs de benchmarking des émissions de gaz à effet de serre (Eges) selon la typologie et la hauteur des bâtiments résidentiels (en kgCO₂e/m².an)

Eges [KgCO2eq/m².a]											
Typologie	Logements collectifs						Maisons individuelles ou accolées				
Hauteur	Coll_R+0 (n=34)	Coll_R+2 (n=20)	Coll_R+3 (n=44)	Coll_R+4 (n=29)	Coll_moy		Ind_R+0 (n=95)	Ind_R+1 (n=70)	Ind_R+2 (n=211)	Ind_R+3 (n=18)	Ind_moy
Maximum	42.23	38.50	42.05	37.65	40.11		33.56	35.48	38.33	30.38	34.44
Minimum	18.80	16.70	15.00	15.63	16.53		11.97	16.75	13.68	16.23	14.66
Valeur cible (Q1)	22.49	26.90	19.87	22.55	22.95		20.81	20.78	20.39	25.24	21.80
Moyenne	27.34	28.72	26.46	26.43	27.23		24.57	24.96	24.35	26.11	25.00
Valeur de référence (médiane)	27.38	28.71	27.30	26.47	27.47		24.65	23.82	23.22	28.12	24.95

Tableau 9 Statistiques descriptives et valeurs de benchmarking des émissions de GES liées aux Produits de Construction et Équipements (EGES PCE) selon la typologie et la hauteur des bâtiments résidentiels (en kgCO₂e/m².an)

Eges PCE [KgCO2eq/m².a]											
Typologie	Logements collectifs						Maisons individuelles ou accolées				
Hauteur	Coll_R+0 (n=34)	Coll_R+2 (n=20)	Coll_R+3 (n=44)	Coll_R+4 (n=29)	Coll_moy		Ind_R+0 (n=95)	Ind_R+1 (n=70)	Ind_R+2 (n=211)	Ind_R+3 (n=18)	Ind_moy
Maximum	23.49	25.58	26.42	19.35	23.71		24.77	24.47	24.87	13.92	22.01
Minimum	4.08	11.88	7.33	10.87	8.54		6.72	8.70	8.64	11.73	8.95
Valeur cible (Q1)	11.63	13.28	10.72	14.64	12.57		12.72	12.10	12.85	12.64	12.58
Moyenne	13.63	16.95	14.34	15.53	15.11		13.47	13.22	14.26	13.11	13.52
Valeur de référence	14.83	15.66	14.70	15.72	15.23		13.54	13.44	13.45	13.44	13.47

Tableau 10 Statistiques descriptives et valeurs de benchmarking des émissions de GES liées aux consommations opérationnelles (EGES OPE) selon la typologie et la hauteur des bâtiments résidentiels (en kgCO₂e/m².an)

Eges OPE [KgCO2eq/m².a]											
Typologie	Logements collectifs						Maisons individuelles ou accolées				
Hauteur	Coll_R+0 (n=34)	Coll_R+2 (n=20)	Coll_R+3 (n=44)	Coll_R+4 (n=29)	Coll_moy		Ind_R+0 (n=95)	Ind_R+1 (n=70)	Ind_R+2 (n=211)	Ind_R+3 (n=18)	Ind_moy
Maximum	22.63	20.62	20.76	20.97	21.25		18.42	21.94	19.91	17.07	19.34
Minimum	4.79	3.88	3.71	3.79	4.04		4.88	3.71	3.40	4.23	4.05
Valeur cible (Q1)	11.97	6.63	6.12	6.32	7.76		6.93	6.79	6.40	11.89	8.00
Moyenne	13.71	11.77	12.12	10.90	12.12		11.10	11.74	10.09	13.00	11.48
Valeur de référence (médiane)	14.33	12.79	12.53	11.83	12.87		10.51	12.45	9.98	14.61	11.89