Are benthic nutrient fluxes from intertidal mudflats driven by surface sediment characteristics?

Justine Louis[1], Laurent Jeanneau[2], Françoise Andrieux-Loyer[3], Gérard Gruau[2], Florian Caradec[3], Nathalie Lebris[1], Marion Chorin[1], Emilie Jardé[2], Emilie Rabiller[3], Christophe Petton[2], Guillaume Bouger[1], Patrice Petitjean[2], Anniet M. Laverman[1]*

1: Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), ECOBIO – UMR 6553, Université de Rennes 1, 35042 Rennes, France

2: Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), Géosciences Rennes – UMR 6118, Université de Rennes 1, 35042 Rennes, France

3: Ifremer, DYNECO PELAGOS, ZI Pointe du Diable, 29280 Plouzané, France

* corresponding author at: ECOBIO – UMR 6553, Université de Rennes 1, Campus de Beaulieu, bât.14A, bureau 122, 35042 Rennes, France. Phone number: 02 23 23 51 13. E-mail address: justine.louis@univ-rennes1.fr

Supplementary Information

Figure S1. Sediment sampling with one PVC core (id = 9 cm, h = 5 cm) for analysis of physico-chemical (A), and another one (id = 6 cm, h = 20 cm) in the upper 10 cm sediment layer for benthic flux measurements (B).

Figure S2. Relationships of ratios N:P fluxes with **PO_4** fluxes ($\mu mol.m^{-2}.h^{-1}$) (A) and NH_4^+ fluxes ($\mu mol.m^{-2}.h^{-1}$) (B) (logarithmic scale). The blue straight line represents the linear regression between the two variables. Correlations were significant with a confidence level < 0.1 %. R-square (r^2) of linear regressions were 0.29 with PO_4 fluxes (A) and 0.37 with NH_4^+ fluxes (B).

Figure S3. PO_4 fluxes ($\mu mol.m^{-2}.h^{-1}$) versus chlorophyll *a* content ($\mu g.g^{-1}$) (A), phaeopigment content ($\mu g.g^{-1}$) (B), C:N ratio ($mol.mol^{-1}$) (C), **TN:Org-P** ratio ($mol.mol^{-1}$) (D), TOC content (E), mud content (%) (F), porosity (%) (G), Org-P content (%) (H), and Fe-P content (I). Molar C:N and **TN:Org-P** ratios were calculated from TOC, TN and Org-P content.

Figure S4. NH_4^+ fluxes ($\mu mol.m^{-2}.h^{-1}$) versus chlorophyll *a* content ($\mu g.g^{-1}$) (A), phaeopigment content ($\mu g.g^{-1}$) (B), C:N ratio ($mol.mol^{-1}$) (C), **TN:Org-P** ratio ($mol.mol^{-1}$) (D), TOC content (E), mud content (%) (F), porosity (%) (G), TN content (%) (H). Molar C:N and **TN:Org-P** ratios were calculated from TOC, TN and Org-P content

Table S1. Data compilation of phosphate (**PO_4**) and ammonium (NH_4^+) fluxes ($\mu mol.m^{-2}.h^{-1}$), mud content (%), porosity (%), chlorophyll *a* content ($\mu g.g^{-1}$), phaeopigment content ($\mu g.g^{-1}$), total nitrogen content (%), total organic carbon content (%), C:N ratio ($mol.mol^{-1}$), total phosphorus content (%), organic phosphorus content (%), iron-bound phosphorus content (%), and **TN:Org-P** ratio ($mol.mol^{-1}$) measured on 45 sites on the Brittany coast from sediment samples collected during April-June 2019. Molar C:N and **TN:Org-P** ratios were calculated from total organic content, total nitrogen and organic phosphorus content.

Table S2. R-square (r^2) and Root Mean Square Error (RMSE) computed from k-fold cross validation (k= 10) from models built by linear regression. MLR (Multiple Linear Regression) was used to build

the best model to predict PO_4 flux by combining parameters from the stepwise selection procedure. AIC corresponds to the Akaike information criterion to compare the models.

Table S3. R-square (r^2) and Root Mean Square Error (RMSE) computed from k-fold cross validation (k= 10) from models built by linear regression. MLR (Multiple Linear Regression) was used to build the best model to predict NH_4^+ flux by combining parameters from the stepwise selection procedure. AIC corresponds to the Akaike information criterion to compare the models.

Figure S1.

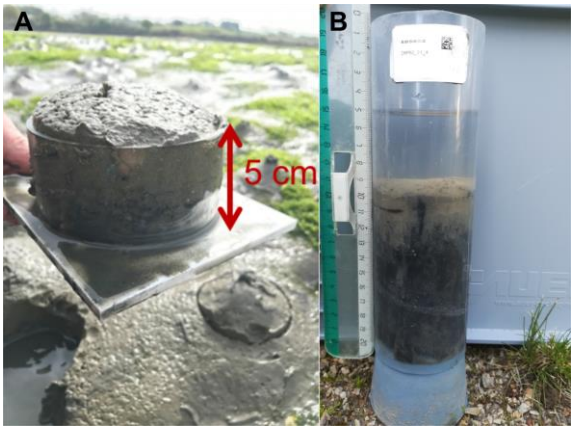

Figure S2.

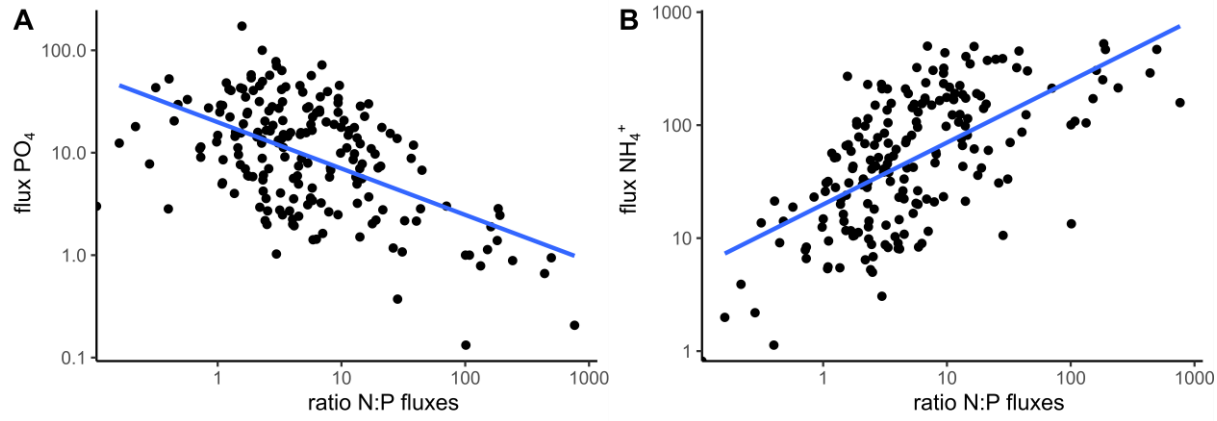

Figure S3.

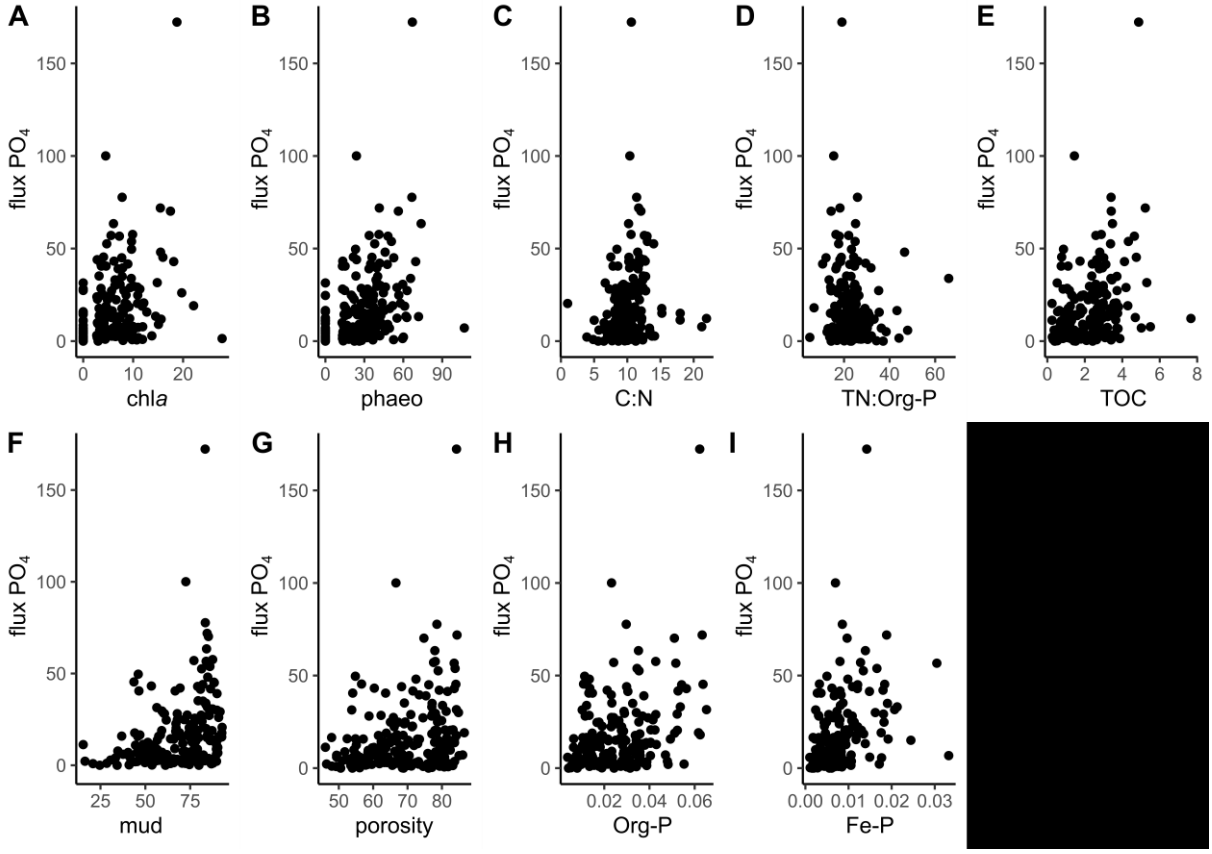

Figure S4.

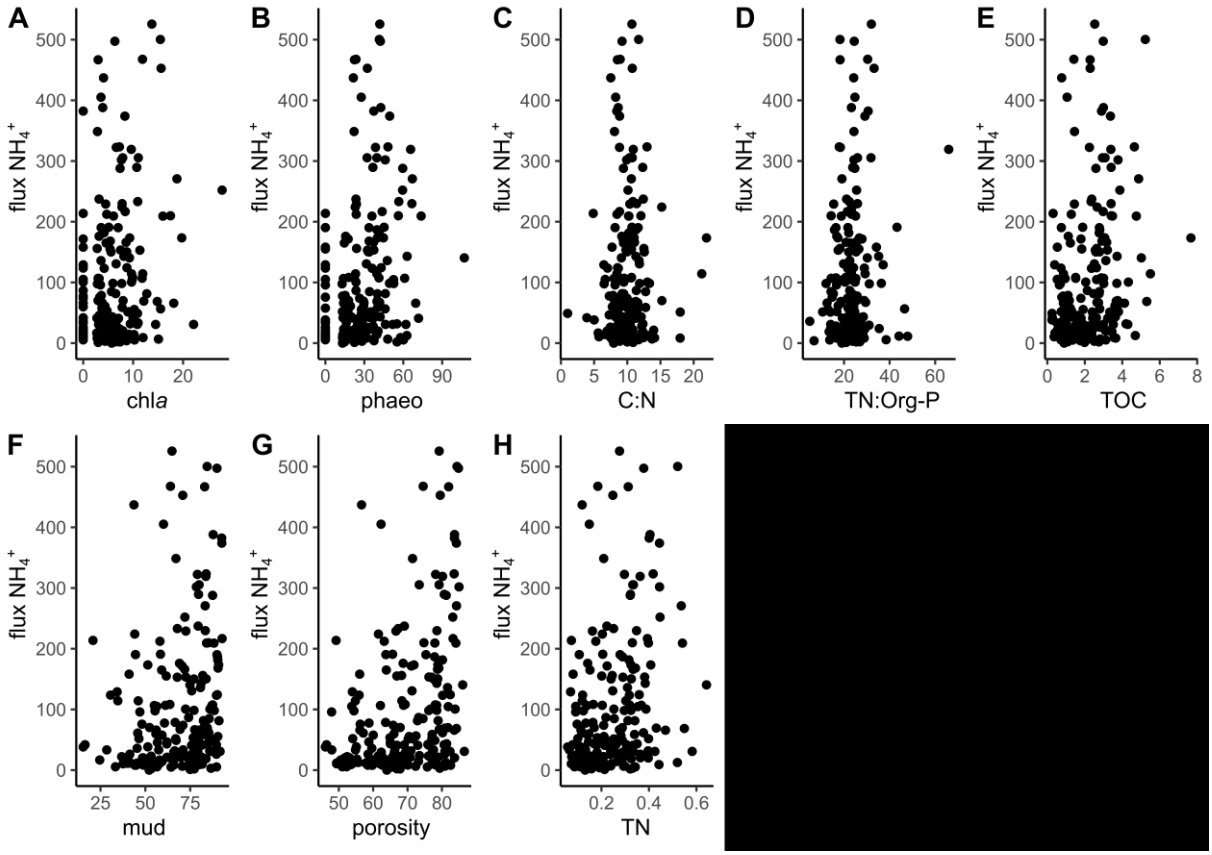

Table S1.

Mudflat	Sampling period	Sites		n	PO_4 Flux (µmol.m^{-2}.h^{-1})		NH_4^+ Flux (µmol.m^{-2}.h^{-1})		Mud [clay + silt] (%)		Porosity (%)		Chlorophyll *a* (µg.g^{-1})		Phaeopigment (µg.g^{-1})		Total Nitrogen (%)		Total Organic Carbon (%)		C:N (mol.mol^{-1})		Total Phosphorus (%)		Organic Phosphorus (%)		Iron-bound Phosphorus %		TN:Org-P (mol.mol^{-1})	
					mean	sd	mean	sd	mean	sd	mean	sd	mean	sd	mean	sd	mean	sd	mean	sd	mean	sd	mean	sd	mean	sd	mean	sd	mean	sd	mean	sd
Trieux Estuary	April 2019	#1	"Kerbiguet"	5	18,4	5,1	75,6	91,8	73,7	4,1	66,8	0,8	5,7	4,0	40,4	14,7	0,25	0,05	2,2	0,4	10,1	0,4	0,049	0,010	0,023	0,003	0,009	0,006	23,7	1,7
		#2	"Anse de Caramel"	5	20,5	7,4	59,6	42,5	78,8	4,1	72,9	4,2	6,1	2,4	43,5	19,1	0,31	0,06	3,1	0,7	11,8	0,4	0,064	0,010	0,034	0,007	0,010	0,003	20,0	2,3
		#3	"Plage du Lédano"	5	25,6	18,5	79,7	25,4	46,7	0,9	54,0	3,6	5,1	2,6	11,1	10,8	0,11	0,01	0,8	0,1	8,7	0,5	0,032	0,002	0,012	0,001	0,003	0,002	19,0	4,0
		#4	"Coz Castel"	5	16,9	11,9	71,7	31,8	60,2	4,5	58,4	5,0	2,0	1,9	13,7	9,3	0,15	0,06	1,0	0,5	7,4	1,1	0,035	0,007	0,013	0,006	0,003	0,001	24,7	4,2
Ria Etel	May 2019	#5	"Notre Dame de Pitié"	4	1,3	1,4	95,7	57,3	44,1	9,1	58,9	5,3	< DL		4,0	8,0	0,10	0,03	0,7	0,3	7,7	0,9	0,050	0,024	0,018	0,021	0,002	0,001	25,1	14,5
		#6	"Pointe de Guerverh"	4	3,6	5,2	77,6	91,4	19,3	4,3	48,1	2,2	1,7	3,4	3,4	6,8	0,07	0,01	0,3	0,1	4,8	0,7	0,013	0,002	0,007	0,001	0,003	0,001	22,8	2,1
		#7	"Néguan"	4	2,4	1,7	41,4	55,6	52,7	20,3	64,2	9,5	2,9	3,8	13,2	15,3	0,16	0,06	1,2	0,7	8,6	1,6	0,032	0,015	0,017	0,010	0,004	0,002	22,1	5,3
		#8	"Pointe de Ninezveur "	4	8,7	9,9	309,6	152,9	75,4	7,1	77,1	4,4	3,1	2,7	26,7	8,0	0,27	0,05	2,0	0,4	8,7	0,6	0,104	0,018	0,030	0,009	0,007	0,002	20,4	2,8
		#9	"Pont Carnac"	4	0,6	1,1	62,0	42,5	67,2	11,9	71,7	3,7	0,7	1,5	21,5	5,4	0,21	0,03	1,9	0,5	10,2	1,3	0,057	0,010	0,024	0,005	0,005	0,001	19,9	3,9
Lorient Bay	May 2019	#10	"Quelisoy Côte"	4	47,8	27,8	200,4	115,1	84,0	0,5	79,5	1,6	7,3	1,8	62,0	13,7	0,36	0,02	3,5	0,1	11,2	0,8	0,056	0,014	0,026	0,010	0,009	0,004	36,3	19,8
		#11	"Quelisoy Bruyère"	4	22,6	14,0	184,4	89,0	72,2	12,1	74,0	6,1	6,8	1,5	49,3	9,9	0,31	0,08	3,1	0,9	11,4	1,3	0,047	0,008	0,019	0,006	0,006	0,002	36,7	4,8
		#12	"Locmiquélic"	4	6,8	6,2	35,4	27,0	74,1	8,2	74,6	5,4	7,1	2,5	29,6	9,3	0,23	0,06	2,4	1,0	12,1	2,1	0,048	0,003	0,020	0,003	0,005	0,001	24,6	3,2
		#13	"Sterbouest"	4	51,2	6,8	102,0	57,7	81,3	3,7	80,5	2,8	5,9	2,7	42,6	8,0	0,30	0,06	3,4	0,7	12,8	0,9	0,069	0,006	0,031	0,005	0,014	0,002	21,8	3,0
		#14	"Talhouët"	4	41,7	10,7	117,0	139,2	79,8	7,0	79,2	3,0	6,2	1,9	42,3	4,1	0,34	0,06	3,6	0,8	12,2	0,9	0,083	0,024	0,040	0,016	0,022	0,006	21,0	6,9
Morlaix Bay	May 2019	#15	"Coatiles"	5	5,7	5,2	11,0	7,9	77,0	1,9	67,0	1,4	3,7	2,4	22,3	5,8	0,21	0,01	1,8	0,1	10,4	0,5	0,044	0,006	0,024	0,005	0,007	0,002	19,4	3,8
		#16	"Frout"	5	29,6	10,2	126,7	91,6	77,1	5,7	68,2	1,3	2,4	1,3	19,8	4,3	0,20	0,05	1,8	0,7	10,5	1,8	0,048	0,007	0,024	0,004	0,009	0,001	18,0	2,4
		#17	"Garosse"	5	11,4	8,6	26,7	20,1	74,1	12,8	64,9	3,9	3,0	1,8	15,3	8,8	0,19	0,03	1,4	0,2	9,1	0,9	0,040	0,007	0,020	0,006	0,006	0,002	21,7	3,0
		#18	"Kerprigent"	5	9,4	9,0	19,3	5,5	58,3	11,5	57,3	8,4	3,8	1,0	16,8	12,0	0,15	0,06	1,1	0,5	8,4	0,7	0,039	0,011	0,018	0,009	0,004	0,001	20,4	3,9
		#19	"Pointe Saint Jean"	5	8,0	6,6	31,7	21,4	55,5	7,0	56,0	3,8	3,5	3,3	16,4	4,7	0,13	0,03	1,0	0,3	9,2	0,4	0,035	0,004	0,013	0,004	0,003	0,002	23,2	7,0
		#20	"Pempoul"	5	18,7	12,9	71,9	56,4	60,1	5,8	61,1	3,7	3,3	1,9	8,8	8,1	0,14	0,02	1,1	0,1	8,8	1,3	0,040	0,004	0,014	0,002	0,004	0,000	23,2	1,1
Goulven Bay	May 2019	#21	"Anse de Goulven"	5	18,4	14,3	106,7	95,7	46,5	7,4	64,9	4,9	8,4	2,3	29,1	11,3	0,26	0,10	4,2	2,4	17,8	3,9	0,050	0,007	0,022	0,008	0,007	0,001	26,9	2,3
Aber Wrac'h	May 2019	#22	"Baie des Anges"	5	7,3	5,1	14,0	5,9	39,9	3,1	53,9	3,4	0,6	1,2	< BL		0,09	0,02	0,6	0,2	8,2	1,4	0,033	0,002	0,007	0,002	0,004	0,001	29,8	10,5
		#23	"Saint Antoine"	5	12,0	4,8	26,8	20,3	55,7	6,8	63,5	8,3	2,5	4,0	10,4	16,2	0,19	0,12	1,8	1,1	11,5	1,3	0,054	0,010	0,019	0,010	0,008	0,003	21,7	2,6
		#24	"Kerazan"	5	3,7	2,3	17,5	10,9	42,8	12,4	56,5	6,9	1,5	2,1	9,8	9,4	0,12	0,05	0,8	0,2	8,2	1,3	0,068	0,018	0,009	0,004	0,005	0,002	29,9	8,6
Pont L'Abbé	June 2019	#25	"Menhir Mouillé"	4	8,2	11,1	139,1	126,2	79,3	5,5	78,5	1,7	7,8	2,8	31,1	4,8	0,34	0,03	3,1	0,5	10,6	0,8	0,079	0,005	0,036	0,008	0,009	0,002	20,9	3,7
		#26	"Feunteun Fen"	4	42,4	22,1	211,8	203,4	84,9	2,5	83,4	1,7	14,6	1,7	36,6	5,4	0,51	0,05	4,7	0,7	10,8	0,8	0,100	0,013	0,059	0,011	0,017	0,005	19,5	2,0
		#27	"Anse du Pouldon"	4	17,8	10,3	61,9	62,4	70,0	6,3	78,7	5,6	13,4	5,9	34,4	12,0	0,36	0,15	2,4	1,7	7,4	4,3	0,079	0,014	0,039	0,015	0,011	0,005	20,4	2,4
		#28	"Ile-Tudy"	4	66,3	71,3	89,9	123,2	74,1	10,5	82,1	2,8	14,8	4,3	58,5	13,5	0,43	0,12	3,7	1,1	10,0	0,5	0,087	0,018	0,050	0,015	0,012	0,002	19,1	0,8
Port la Forêt	June 2019	#29	"Anse de Penfoulic"	5	3,8	2,2	13,3	17,4	56,2	3,9	64,7	1,9	5,5	0,9	17,0	3,1	0,16	0,02	1,2	0,2	8,9	0,8	0,036	0,003	0,015	0,002	0,005	0,000	23,6	3,3
		#30	"Cale de Pen An Cap"	5	8,8	9,2	152,5	126,4	71,4	6,1	79,2	7,5	12,0	9,1	33,2	22,3	0,35	0,10	3,0	0,9	10,0	0,4	0,052	0,010	0,031	0,009	0,006	0,002	25,2	1,1
		#31	"Port la Forêt"	5	9,3	4,9	70,0	70,4	74,7	3,7	78,8	4,9	5,6	3,5	54,9	32,0	0,44	0,14	3,7	1,1	10,0	0,6	0,063	0,013	0,036	0,012	0,008	0,002	28,0	5,0
Rance Estuary	June 2019	#32	"Plage de la Ville Ger"	4	31,5	17,4	52,4	38,6	81,8	6,1	71,4	3,9	9,0	4,8	41,6	9,9	0,25	0,05	2,7	0,7	13,0	3,3	0,084	0,019	0,041	0,022	0,015	0,007	19,9	18,1
		#33	"Les Ferrières"	4	53,5	41,7	123,9	112,2	83,4	7,5	72,2	4,1	10,3	5,4	43,8	17,3	0,27	0,08	2,6	0,9	11,0	0,7	0,084	0,019	0,046	0,015	0,010	0,005	13,5	2,1
		#34	"Minihic sur Rance"	4	34,2	18,7	164,5	38,7	89,6	1,5	77,5	1,5	10,2	6,7	39,8	4,6	0,30	0,02	2,9	0,1	11,1	0,5	0,072	0,003	0,041	0,002	0,008	0,001	16,5	0,6
		#35	"Les Gastines"	4	17,6	9,3	68,6	32,8	90,1	2,0	74,8	3,7	11,4	1,1	43,8	13,9	0,31	0,07	2,7	0,5	10,0	0,6	0,094	0,006	0,047	0,008	0,020	0,010	14,6	1,3
		#36	"Anse des Rivières"	4	10,7	11,2	29,0	37,2	80,5	3,6	68,0	4,6	3,7	2,5	26,3	5,4	0,21	0,03	2,1	0,6	11,6	1,7	0,062	0,006	0,030	0,007	0,008	0,005	15,7	1,4
Auray River	June 2019	#37	"Kerouarc'h"	5	9,7	7,3	98,7	86,0	89,7	2,2	81,2	1,6	6,5	2,1	37,2	6,4	0,35	0,03	2,7	0,2	8,8	0,2	0,062	0,005	0,034	0,004	0,007	0,001	22,7	1,2
		#38	"Le Moustoir"	5	13,0	11,1	156,8	92,0	89,0	1,7	80,6	1,0	6,1	2,6	44,9	10,8	0,33	0,02	2,7	0,1	9,6	0,6	0,055	0,002	0,031	0,002	0,006	0,002	23,6	1,5
		#39	"Locmiquel"	5	20,4	16,3	229,7	186,5	52,0	7,5	60,6	3,0	2,9	1,6	15,9	10,3	0,13	0,02	0,9	0,1	7,9	0,4	0,027	0,004	0,012	0,001	0,004	0,001	23,5	1,7
Vannes Estuary	June 2019	#40	"Arcal"	4	3,1	1,8	96,3	81,6	63,7	13,1	68,9	6,9	4,5	1,5	26,4	13,5	0,21	0,07	1,5	0,6	8,6	0,5	0,046	0,017	0,019	0,007	0,011	0,005	24,9	2,6
		#41	"Cantizac"	4	19,2	7,4	410,4	58,2	90,7	2,3	84,1	0,6	4,6	3,6	43,0	5,0	0,41	0,03	3,1	0,2	8,8	0,3	0,068	0,003	0,034	0,004	0,012	0,003	26,9	3,6
		#42	"Barrarac'h"	4	7,6	4,6	12,3	12,3	72,6	12,5	74,9	8,5	9,7	7,0	40,0	20,5	0,30	0,11	2,3	1,0	8,9	0,9	0,048	0,014	0,028	0,010	0,006	0,001	23,7	0,8
Morbihan Gulf	June 2019	#43	"Le Passage"	4	5,7	9,5	160,6	106,0	80,5	7,4	77,9	4,6	5,6	5,0	28,7	8,3	0,29	0,05	2,6	0,7	10,5	1,3	0,049	0,009	0,025	0,005	0,007	0,004	25,9	1,7
		#44	"Lasné"	4	4,2	5,2	388,6	189,5	65,8	3,4	75,6	4,8	12,8	2,5	28,9	10,4	0,22	0,05	1,9	0,6	10,3	0,9	0,038	0,004	0,017	0,002	0,008	0,002	29,1	5,7
		#45	"Kerbodec"	4	3,1	1,4	7,3	1,4	62,7	15,7	73,2	14,1	5,5	4,1	8,4	9,8	0,16	0,06	1,8	0,9	12,7	1,4	0,032	0,013	0,016	0,009	0,003	0,000	25,9	8,8

Table S2.

flux PO_4	**r^2 (±SD)**	**RMSE (±SD)**	**AIC**
Chl*a*	0,17 (±0,18)	18,25 (±6,97)	1734,93
phaeo			
C:N	0,09 (±0,12)	18,80 (±7,20)	1751,86
TN:Org-P	0,05 (±0,07)	19,17 (±6,70)	1756,77
TOC	0,16 (±0,15)	18,20 (±6,52)	1732,68
mud	0,15 (±0,11)	17,68 (±8,61)	1746,19
porosity	0,11 (±0,09)	18,24 (±7,87)	1741,06
Org-P	0,21 (±0,19)	18,09 (±6,59)	1729,27
Fe-P	0,24 (±0,17)	17,89 (±7,31)	1729,05
MLR (phaeo + Fe-P + porosity + Org-P)	**0,24 (±0,20)**	**17,40 (±7,19)**	**1717,79**

Table S3.

flux NH_4^+	**r^2 (±SD)**	**RMSE (±SD)**	**AIC**
chl*a*	0,13 (±0,16)	110,28 (±25,98)	2436,25
phaeo	0,14 (±0,13)	109,54 (±24,92)	2433,61
C:N	0,03 (±0,04)	114,66 (±23,85)	2451,21
TN:Org-P	0,04 (±0,07)	112,27 (±28,17)	2446,56
TOC	0,15 (±0,14)	110,63 (±23,85)	2436,71
mud	0,07 (±0,09)	112,58 (±19,13)	2441,90
porosity	0,15 (±0,12)	107,40 (±23,62)	2426,30
TN	0,16 (±0,14)	109,17 (±24,03)	2431,25
MLR (porosity + TN:Org-P + chl*a* + C/N)	**0,18 (±0,15)**	**107,37 (±24,04)**	**2421,35**